



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LAURI RANTALA
VESIJOHTOVERKOSTON VEDENLAADUN JATKUVATOIMISEN
MITTAUKSEN SIJOITTELUN SUUNNITTELU

Diplomityö

Tarkastaja: professori Jukka Rintala
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
28. toukokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

Lauri Rantala: Vesijohtoverkoston vedenlaadun jatkuvatoimisen mittauksen sijoittelun suunnittelu

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 48 sivua, 4 liitesivua

Toukokuu 2018

Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Yhdyskuntien ympäristötekniikka

Tarkastaja: professori Jukka Rintala

Avainsanat: Vedenlaatu, jatkuvatoiminen mittaus, aikainen varoitusjärjestelmä, mittalaitteen sijaintisuositus, TEVA-SPOT

Vesilaitosten tehtävänä on tuottaa puhdasta juomavettä, toimittaa se asiakkaiden käytettäväksi, johdattaa jätevesi pois sekä käsitellä se. Vesilaitokset on velvoitettu toimittamaan kaikki laatuksiteerit täyttävää vettä asiakkaan hanaan asti. Vesijohtoverkosto on kriittinen komponentti tämän toteuttamiseksi, sillä vedenlaatu voi muuttua vedenpuhdistamolta lähtemisen jälkeen. Vesilaitoksille kiristynyt lainsäädäntö sekä jatkuvatoimisten mittareiden salliminen viranomaisvalvontaan luo tarpeita parantaa vesijohtoverkoston vedenlaadun tarkkailua sekä hallintaa.

Tällä hetkellä vesilaitosten ei ole mahdollista saada kiinni vesijohtoverkostoissa tapahtuvia äkkinäisiä vedenlaadullisia muutoksia, missä veteen pääsee haitallisia aineita. Kyseessä olevat kontaminaatiotapahtumat ovat harvinaisia, mutta voivat aiheuttaa paljon vahinkoa tapahtuessaan. Yhtenä ratkaisuna kontaminaatiotapausten käsittelyyn on ehdotettu aikaista varoitusjärjestelmää. Aikaisen varoitusjärjestelmän tarkoituksena on havaita kontaminaatio ajoissa ja antaa vesilaitokselle mahdollisuus vähentää sekä taloudellisia vahinkoja että kuluttajien terveydelle aiheutuvia haittavaikutuksia. Kyseinen systeemi on ennaltaehkäisevä lähestymistapa, mikä käyttää kehittyntä mittalaiteteknologiaa ja tehostettuja valvontatoimia kerätäkseen, yhdistääkseen ja analysoidakseen informaatiota, tavoitteenaan tuottaa tarkoituksenmukainen varoitus mahdollisimman nopeasti kontaminaatiotapauksesta. Vesilaitoksille ei ole olemassa yleisiä ohjesääntöjä siitä, mihin kohtaa verkostoa jatkuvatoimisia mittalaitteita olisi hyvä sijoittaa.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää vesijohtoverkoston vedenlaadun jatkuvatoimisen mittaamisen nykytilanne sekä tuottaa mittalaitteiden sijoittamiselle suosituksia kohdealueen verkostossa. Työssä käytettiin TEVA-SPOT-GUI –ohjelmaa kohdealueen vesijohtoverkoston vedenlaadun mittaukseen tarkoitettujen mittalaitteiden sijoittamisen optimointiin. Kohdealueen vesijohtoverkosto on mallinnettu FCGnet-ohjelmalla, mitä käytettiin tässä työssä hyväksi. TEVA-SPOT-GUI –ohjelmalla tehtyjen mallinnusten perusteella työn kohteena olevalle vesilaitokselle ehdotettiin sijaintisuosituksia vedenlaadun jatkuvatoimiseen mittaukseen tarkoitetuille mittalaitteille. Saatuja tuloksia on havainnollistettu esimerkkimallilla.

ABSTRACT

Lauri Rantala: Online Water Quality Monitoring Placement design in a Water Distribution Network

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 48 pages, 4 Appendix pages

May 2018

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Municipal Environmental Engineering

Examiner: Professor Jukka Rintala

Keywords: water quality, online measurement, early warning system, TEVA-SPOT

It is a water utility's job to provide drinking water and wastewater services to their customers. Water utilities are obligated to provide water that fulfills all the required quality criteria to the customers' taps. Water distribution network plays a major role in this, as water may become contaminated after leaving the treatment plant. Ever increasing government regulation and online monitoring systems being allowed in official water quality monitoring tasks creates a need for water utilities to improve their capabilities for water distribution network water quality monitoring and control.

At this moment, water utilities do not generally have a chance to catch sudden water quality changes in the water distribution network. These contamination incidents are rare but can cause severe damage once happened. One suggested solution to dealing with contamination incidents is an early warning system. This system's purpose is to detect a contamination incident early on and thus give the water utility a chance to reduce economical damages and adverse effects to consumers' health. An early warning system is a preventive approach, which utilises advanced sensor technology and enhanced monitoring actions to gather, combine and analyze information with the goal of creating a reliable warning of a contamination incident. Water utilities do not have general guidance rules on where online water quality measurement sensors should be placed in the water distribution network.

The aim of this research was to examine current online measurement possibilities and to make recommendations on online sensor locations for Tampere Water. In this work, TEVA-SPOT-GUI toolkit was used to determine optimal placement solutions for online water quality sensors. The water distribution network of the water utility in question had been modelled with the FCGnet-software and the model was used in this work. Sensor placement recommendations were acquired using the TEVA-SPOT-GUI toolkit and these were provided to the water utility. Results are illustrated using an example model.

ALKUSANAT

Työssä kohdattiin hieman globalisaation ongelmia, sillä Yhdysvaltain presidentin vaihduttua loppui rahoitus tässä työssä käytetylle vielä osaksi kehitysvaiheessa olevalle ohjelmalle. Loppujen lopuksi isommilta ongelmilta vältyttiin Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston kontaktin ansiosta.

Esitän kiitokseni työni tarkastajalle Jukka Rintalalle (TTY) sekä ohjaajalle Riitta Kettuselle (Tampereen Vesi). Erityiskiitoksen diplomityön aiheen alkuperäisestä ehdottamisesta ja ohjaajana toimimisesta haluan antaa Pekka Laakkoselle (Tampereen Vesi). Haluan myös kiittää Markus Sunelaa (Fluidit) sekä Mika Kurosta (Fluidit) neuvojen antamisesta mallintamisen alkuun pääsemisessä. Kiitos kuuluu myös työtä rahoittaneelle Erkki Paasikiven säätiölle sekä Maa- ja vesitekniikan tuki ry:lle.

I would also like to give a special thank you to Robert Janke (United States Environmental Protection Agency) for all the help with the TEVA-SPOT –software, reading recommendations and great answers to my questions regarding different topics.

Lisäksi kiitän vielä ystäviäni sekä perhettäni tuen ja avun saamisesta aina sitä pyydettyessä.

Tampereella 28.5.2018

Lauri Rantala

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	VEDENLAATU.....	3
2.1	Veden yleiset laatuvaatimukset	4
2.2	Vedenlaatua koskevat asetukset	4
2.3	Mikrobiologinen laatu	5
2.4	Vesijohtoverkoston vaikutus vedenlaatuun.....	7
2.4.1	Saostumat ja biofilmi	8
3.	AIKAISET VAROITUSJÄRJESTELMÄT	10
3.1	Älykäs vesijohtoverkosto	11
3.2	Verkoston mallinnus	12
3.3	Indikaattoriparametreihin perustuvat mittausmenetelmät.....	14
3.4	Spesifisiä mikrobiologisen laadun mittausmenetelmiä	16
3.5	Mittausaineiston tulkitseminen	17
3.6	Mittalaitteiden sijoittelun periaatteet.....	20
3.6.1	Mittalaitteiden sijoittelun optimointi	21
3.6.2	Kontaminaatioskenaario.....	24
3.6.3	Laskennallisia huomioita	24
3.7	Asiakkaiden ilmoitusten dokumentointi ja käyttö.....	25
3.8	Vesilaitoksen reagointi kontaminaation havaitsemiseen.....	26
4.	AINEISTO JA MENETELMÄT	28
4.1	Kohdealue.....	28
4.2	Mallinnus.....	28
4.3	Verkoston katsaus	30
5.	TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	34
5.1	Mittalaitteiden sijoitus.....	34
5.2	Väestön tartunnan saaminen.....	36
5.3	Vesilaitoksen reagointiaika	37
5.4	Sijoittamisen rajoittaminen kiinteistöihin	40
5.5	Mallissa olevien solmujen määrän tiheys.....	41
6.	JOHTOPÄÄTÖKSET	43
	LÄHTEET	44

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Endeeminen tauti	Paikallisesti jatkuvasti esiintyvä, jollekin alueelle ominainen tauti.
EPANET	Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston tekemä julkisohjelma, joka toimii perustana suurimmalle osalle kaupallisista vesijohtoverkoston mallinnussovelluksista.
FCGnet	Finnish Consulting Groupin EPANET-pohjainen sovellus, jolla voi mallintaa ja simuloida vesijohtoverkoston toimintaa.
TEVA-SPOT	Threat Ensemble Vulnerability Assessment – Sensor Placement Optimization Tool. Verkoston riskinhallintaan ja aikaisen varoitussjärjestelmän suunnitteluun tarkoitettu ohjelma.
USEPA	United States Environmental Protection Agency – Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviranomainen.
Veden ikä	Aika minkä vesi on laskennallisesti viettänyt vesijohtoverkostossa.
WSP	Water Safety Plan – Talousveden toimenpideohjelma, minkä tarkoituksena on parantaa riskinhallinta.

1. JOHDANTO

Vesihuoltoverkostojen keskimääräinen ikä Suomessa nousee tasaisesti saneeraustason ollessa riittämätön. Putkien vanheneminen voi laskea verkoston toimintakykyä, minkä takia on syytä kehittää keinoja verkoston hallinnan ja toimintavarmuuden kehittämiseksi. Yhtenä haasteena vesilaitoksilla on vesihuoltoverkostoista olevan verkostotiedon heikkous. Siitä voi puuttua kriittisiä tietoja eri putkiosuuksilta kuten materiaali-, sijainti- tai ikätietoja. Tämä vaikeuttaa huomattavasti verkoston ylläpitoa ja hallintaa. (Vehmaskoski 2015)

Vesilaitosten tehtävänä on tuottaa puhdasta juomavettä, toimittaa se asiakkaiden käytettäväksi, johdattaa jätevesi pois sekä käsitellä se. Vesilaitokset on velvoitettu toimittamaan kaikki laatuksiteerit täyttävää vettä asiakkaan hanaan asti. Vesijohtoverkosto on kriittinen komponentti tämän toteuttamiseksi, sillä vedenlaatu voi muuttua vedenpuhdistamolta lähtemisen jälkeen. Vesilaitoksille kiristynyt lainsäädäntö sekä jatkuvatoimisten mittareiden salliminen viranomaisvalvontaan luo tarpeita parantaa vesijohtoverkoston vedenlaadun tarkkailua sekä hallintaa.

Yleensä vesilaitosten ei ole mahdollista saada kiinni vesijohtoverkostoissa tapahtuvia äkkinäisiä vedenlaadullisia muutoksia, missä veteen pääsee haitallisia aineita (Aksela 2012). Kyseessä olevat kontaminaatiotapahtumat ovat harvinaisia, mutta voivat aiheuttaa paljon vahinkoa tapahtuessaan. Yhtenä ratkaisuna kontaminaatiotapausten käsittelyyn on ehdotettu aikaista varoitusjärjestelmää. Aikaisen varoitusjärjestelmän tarkoituksena on havaita kontaminaatio ajoissa ja antaa vesilaitokselle mahdollisuus vähentää sekä taloudellisia vahinkoja että kuluttajien terveydelle aiheutuvia haittavaikutuksia. Kyseinen systeemi on ennaltaehkäisevä lähestymistapa, mikä käyttää kehittyntä mittalaiteteknologiaa ja tehostettuja valvontatoimia kerätäksään, yhdistääksään ja analysoidakseen informaatiota, tavoitteenaan tuottaa tarkoituksenmukainen varoitus mahdollisimman nopeasti kontaminaatiotapauksesta (Panguluri et al. 2009; Storey et al. 2011). Vesilaitoksilla ei ole olemassa yleisiä ohjesääntöjä siitä, mihin kohtaa verkostoa jatkuvatoimisia mittareita olisi hyvä sijoittaa.

Suomessa vesiepidemioita tapahtuu vuosittain alle kymmenen (Taustatietoa vesiepidemioiden). Epidemiaksi lasketaan tapaus, jossa saastuneen veden takia vähintään kaksi henkilöä sairastuu. Yhtenä riskitekijänä vesihuollon lähitulevaisuudessa on vanheneminen, sillä vanhemmalla väestöllä on heikompi immuunisysteemi. Näin ollen vesiepidemian sattuessa on vanhempi väestö erityisen altis vakaville sairauksille (Committee on Indicators for Waterborne Pathogens 2004). Veden saastuminen havaitaan melkein aina vasta siinä vaiheessa, kun ensimmäiset sairaustapaukset tulevat julki. Talousvesi voi liikaantua missä tahansa vesihuollon vaiheessa. Suurin osa vesiepidemioiden Suomessa on

aiheutunut raakavesien erityisesti pohjavesien likaantumisesta. Osa saastumisista on tapahtunut vesitorneissa ja vesijohtoverkostoissa. Vesitorneissa saastuminen voi tapahtua esimerkiksi eläimen tai sadeveden päästyä tilaan. Vesijohtoverkostossa likaantuminen voi johtua putkirikosta, jäteveden pääsystä vesijohtoverkostoon tai vaihtelusta veden virtaussuunnassa (Ikonen 2013). Virtaussuunnan muutos voi irrottaa putkien pinnalle kertynyttä sakkaa ja biofilmiä. Vesiepidemioiden riskiä voidaan vähentää, mutta ei kokonaan poistaa. Vesikriisin jälkeen vesilaitoksilla voi kestää kauan saavuttaa jälleen asiakkaiden luottamus vedenlaadun turvallisuudesta. Yhdysvalloissa on tehty paljon tutkimusta vesiepidemioista, missä on selvinnyt, että iso osa vesihuollosta johtuneista epidemioista on aiheutunut vesijohtoverkostossa olleista ongelmista (Blackburn et al. 2004).

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää vesijohtoverkoston vedenlaadun jatkuvatoimisen mittaamisen nykytilanne sekä tuottaa mittalaitteiden sijoittamiselle suosituksia kohdealueen verkostossa. Työssä käytettiin TEVA-SPOT-GUI -ohjelmaa kohdealueen vesijohtoverkoston vedenlaadun mittaukseen tarkoitettujen mittalaitteiden sijoittamisen optimointiin. Kohdealueen vesijohtoverkosto on mallinnettu FCGnet ohjelmalla, mitä käytettiin tässä työssä hyväksi. Saatuja tuloksia on havainnollistettu esimerkkimallilla.

2. VEDENLAATU

Vedenlaatu on yleisesti käytetty käsite esimerkiksi juomavedestä puhuttaessa. Se viittaa veden fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin ominaisuuksiin ajatellen tiettyä käyttökohdetta. Juomavedeltä vaaditut laatuominaisuudet ovat erilaisia lääketeollisuudelle, kalan kasvattamoille tai muulle teollisuudelle. Täten puhtaan veden kriteerit riippuvat käyttökohteesta (Khublaryan & Moiseenko 2009). Juomaveden laatuun liittyen on monia parametreja, jotka eivät ole käyttäjän terveydelle haitallisia, mutta jotka veden on hyvä täyttää, jotta vesi ei vahingoittaisi vesijohtoverkostoa.

Verkostossa tapahtuvat vedenlaadun muutokset ja niiden hallinta ovat tärkeitä kansanterveydelle ja hyvinvoinnille. Hallintaa vaikeuttaa se, että vedenlaatuun vaikuttavat yhtä aikaa fysikaaliset, kemikaaliset ja biologiset prosessit, sekä ne tapahtuvat laajassa verkostossa, jonka kunto heikkenee ja mitä ei pystytä näkemään. (Aksela 2012)

Vedenlaadun heikkenemiseen vaikuttavia parametreja ja reaktioita ovat muun muassa jäännöskloori, desinfioinnin sivutuotteet, nitrifikaatio, bakteerien kasvu, korroosio, sedimentoituminen, lämpötila, maku ja haju. Monet näistä ovat kineettisesti riippuvaisia ja täten veden viipymisaika verkostossa voi olla indikaattori laadun heikkenemiselle. Veden korkeaa lämpötilaa pidetään yleisesti yhtenä vedenlaadun heikkenemiseen vaikuttavana tekijänä. Monet kemialliset muutokset, jotka vaikuttavat vedenlaatuun, ovat riippuvaisia reaktiokinetikasta, joka on riippuvainen lämpötilasta. Lämpötila myös vaikuttaa mikrobien käyttäytymiseen vedessä. Lämpötila on erityisesti tärkeä vedenlaadun kannalta, sillä se vaikuttaa veden kemiallisiin muutoksiin, bakteerien ominaisuuksiin ja jopa fyysisiin ominaisuuksiin kuten veden tiheyteen. Kemialliset reaktionopeudet ja mikrobien kokonaismäärä ovat yleensä isommat lämpimämmässä vedessä. (Blokker et al. 2016)

Talousvesiasetuksen (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 2015) mukaan talousvesi ei saa altistaa käyttäjiä haitallisessa määrin mikrobeille, muille pieneliöille tai kemiallisille aineille. Talousveden laatuvaatimukset ja -suositukset on esitetty liitteessä 1. Vesijohtoverkoston merkitys on tärkeä, sillä talousvesiasetus ei määrittele vedenpuhdistuslaitokselta lähtevän vedenlaatua vaan veden käyttäjän saamaa vedenlaatua. Vesijohtoverkostossa olevan vedenlaadun tarkkailun vaikeutena on se, että saatu laatu tieto on kuluttajien terveyden näkökulmasta aina myöhässä. Yleensä vesilaitoksille selviää kontaminaatio vasta siinä vaiheessa, kun ensimmäiset asiakkaat ilmoittautuvat sairaalaan. Jatkuvatoimisella mittauksella vesilaitoksen olisi mahdollista siirtyä asiakaslähtöisen tiedon sijasta ennakoivaan tiedonsaantiin.

Vesijohtoverkoston vedenlaadun määrittämiseen tähtäävä tutkimus on vuoden 2001 jälkeen lisääntynyt huomattavasti. Tämä on suurelta osin johtunut terroritekojen estämiseen

ja niiden vaikutusten minimoimiseen tähtäävästä turvallisuusajattelusta. (Panguluri et al. 2009).

2.1 Veden yleiset laatuvaatimukset

Vesilaitoksen käyttäjille toimittaman veden tulee olla terveydelle vaaratonta ja miellyttävää käyttää. Veden tulee olla myös teknisesti hyväksyttävää. Yleiset laatuvaatimukset voidaan esittää jaettuna kolmeen laatuvaatimukseen, mitkä ovat hygieeniset, esteettiset ja tekniset laatuvaatimukset. (Karttunen 2010)

Hygieeniset laatuvaatimukset tarkoittavat sitä, ettei vedessä saa olla ihmisille haitallisia kemikaaleja eikä patogeeneja. Vedessä olevien vieraiden hiukkasten pitoisuuden tulisi olla riittävän pieni, sillä veden desinfiointi häiriintyy, jos pitoisuus on suuri. Tästä syystä veden vieraiden aineiden pitoisuus tai kiintoainepitoisuus usein esitetään terveysvaatimusten yhteydessä. Vedenlaadun esteettisyys tarkoittaa sitä, että veden täytyy olla miellyttävää käyttää. Tämä tarkoittaa, että vedessä ei saa olla sameutta, väriä, hajua tai makua, sekä lämpötilan pitää olla sopiva vuoden ympäri. Hygieenisiin laatuvaatimuksiin verrattuna aistein arvosteltavat ominaisuudet ovat toisarvoisia, mutta niillä on merkitystä, koska vedenkäyttäjät arvostelevat vesilaitosten toimintaa pitkälti omin aistein tekemiin havaintoihin perustuen. Tekniset laatuvaatimukset tarkoittavat sitä, että vesi ei saa aiheuttaa haittaa vedenkäyttäjien putkistoissa ja laitteissa. Tällöin vesi ei syövytä, tuki tai muulla tavoin vahingoita putkia. Teknisten laatuvaatimusten noudattaminen on vesijohdotoverkoston keston ja kunnossa pysymisen takia hyvin tärkeää vesilaitokselle itselleen, sillä jakeluverkosto on vesilaitoksen kallein osa. (Karttunen 2010) Näiden yleisten laatuvaatimusten saavuttaminen ja ylläpito vaativat paitsi suunnittelua sekä hyvää teknistä toteutusta ja aiheellista hoitoa, myös aktiivista valvontaa kaikissa vesilaitoksen toiminnan vaiheissa. (Karttunen 2010)

2.2 Vedenlaatua koskevat asetukset

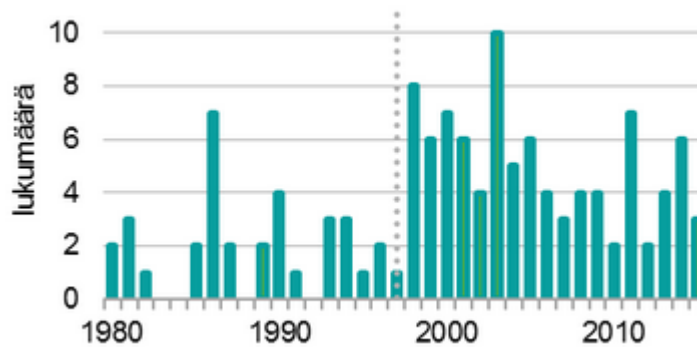
World Health Organization on kehittänyt suosituksia vedenlaatuun liittyen, mutta se ei ole tehnyt kansainvälisiä laustandardeja juomavedelle, koska maakohtaisten standardien ja säädösten tekeminen riski-hyötysuhteella on mielekkäämpää (Guidelines for drinking-water quality, Volume 1 : Recommendations, 2003). Suomessa talousveden laatua ja valvontaa koskevat määräykset sisältyvät terveydensuojelulakiin. Talousvedellä tarkoitetaan kaikkea vettä, joka on tarkoitettu juomavedeksi, ruoan valmistukseen, kotitaloustarkoituksiin sekä elintarvikealan yrityksen tuotteiden valmistukseen, jalostukseen, säilytykseen ja markkinoille saattamiseen. Vesihuoltolaitokset valvovat vettä omatoimisesti, mutta kunnan terveydensuojeluviranomaisen velvollisuutena on säännöllisesti valvoa talousveden laatua. Määräysten pääasiallinen tehtävä on kansalaisten terveyden suojele. Vedenlaadusta raportoidaan Euroopan komissiolle. (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 2015).

Escherichia coli –bakteereille ja suolistoperäisille enterokokeille on mikrobiologiset laatumääräykset (liite 1). Talousveden mikrobiologisten laatuvaatimusten täyttymisen valvonta perustuu edellä mainittujen indikaattoribakteerien käyttöön. Jos näitä bakteereja löytyy hanavedestä, vaaditaan viranomaisilta ja vesilaitokselta välittömiä toimenpiteitä vedenlaadun heikkenemisen syyn etsimiseksi ja korjaamiseksi ja veden käyttäjien terveyden turvaamiseksi. Jos kemialliset laatuarvot ylittyvät talousvedessä, on kunnan terveys- ja suojeluviranomaisten tehtävänä päättää, aiheutuuko siitä käyttäjille terveydellistä vaaraa ja mitä asialle tulee tehdä. (Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista 2015)

Sosiaali- ja terveysministeriön johdolla on laadittu toimenpideohjelma WSP (Water Safety Plan), minkä tarkoituksena on helpottaa vesilaitosten riskienhallintaa. Kyseinen työkalu pohjautuu Maailman terveysjärjestön (World Health Organization) suositteluun malliin. WSP-työkalulla talousvettä toimittava laitos voi tunnistaa vedenlaatua uhkaavat tekijät ja arvioida niistä aiheutuvat riskit koko vedentuotantoketjussa. Vedentuotantoketjuun kuuluvat raakaveden laatu ja siihen vaikuttavat tekijät, veden otto, veden käsittely, sen varastointi sekä jakelu vesijohtoverkostolla. Sitä voidaan käyttää myös selvittämään keinot ja määrittämään tarvittavat toimet riskien vähentämiseksi, vaarojen poistamiseksi ja vedenlaadun turvaamiseksi. WSP:n avulla vesihuoltolaitokset voivat parantaa toimintavarmuuttaan. (Rapala)

2.3 Mikrobiologinen laatu

Suomessa yleisimmät vesiepidemiassa esiintyvät taudinaiheuttajat ovat norovirus ja kampylobakteeri. Norovirus aiheuttaa taudin, jonka oireisiin kuuluvat ripuli, vatsakivut, oksennukset ja usein kuume. Vuonna 2016 Suomessa todettiin 2395 norovirustautia, mutta todellisten tapausten määrä on ollut moninkertainen, sillä viruksen osoittamiseen harvoin pyritään. Taudin itämisaika on melko lyhyt, yleensä 12-48 tuntia. Norovirus tarttuu herkästi myös ihmisestä toiseen. Tällöin vedestä alun perin lähtöisin oleva tauti saattaa levitä, vaikka juomaveden välityksellä uusia tartuntoja ei enää saataisikaan (Lumio). Myös giardia, ameeba (*dietamoeba fragilis*), sekä rota- ja sapovirus on havaittu sairastuneilla. Sapovirus on ongelmallinen vesijohtoverkostoissa, sillä normaali klooraus ei tehoa siihen hyvin (Lappalainen et al.). Suomessa esiintyy vuosittain alle kymmenen vesiepidemiaa (Kuva 1). Vesilaitoksilla on ollut ilmoitusvelvollisuus epidemioista vuodesta 1997 lähtien.



Kuva 1. Suomessa esiintyneet vesiepidemiat 1980-2015. Keskellä oleva katkoviiva osoittaa vesiepidemioiden ilmoitusmenettelyn käyttöönottoajankohdan. (Taustatietoa vesiepidemioista)

Vedenpuhdistuslaitosten yksi tarkoitus on tuottaa patogeenitonta juomavettä, joka ei kuitenkaan tarkoita steriiliä vettä. Vesi voi saastua vesihuollon monessa eri osassa kuten raakaveden lähteessä, vedenpuhdistuslaitoksen puutteellisesta toiminnasta, vesijohtoverkostossa yksittäisestä tapahtumasta tai biofilmin muodostuessa. Osa veden välityksellä aiheutuneista tautien leviämistapauksista on johtunut vesijohtoverkoston ongelmista kuten ristikytkenästä, putkien hajoamisesta, takaisinimusta ja –virtauksesta tai negatiivista painetapahtumista. (Bitton 2014)

Monessa maassa on yleinen käytäntö estää putkien korroosiota sekä turvata veden mikrobiologinen laatu verkostossa lisäämällä klooria verkostoon lähtevään veteen, koska se on yksinkertainen ja halpa menetelmä. Tällöin on usein käytetty jäännöskloorin määrää yleisenä indikaattorina vedenlaadusta vesijohtoverkostossa. Jäännöskloorin testaus on suhteellisen halpaa, helppoa, nopeaa ja voidaan tehdä paikan päällä. Vapaan ja kokonaiskloorin jäännökset kertovat melko tarkasti veden saastumisesta tietyissä tapauksissa kuten mikrobien aiheuttamissa kontaminaatioissa. Kuitenkaan kloori ei vaikuta kaikkiin vedenlaadun parametreihin. Saattaa olla epäkäytännöllistä ylläpitää kloorin jäännöstä koko verkostossa, sillä se voi tulla kalliiksi sekä aiheuttaa maku- ja hajuhaittoja käyttäjille. Verkoston laidoilla olevissa osuuksissa klooripitoisuus voi olla hyvin pieni, sillä veden ikä on isompi kuin muissa osissa verkostoa. Isompi veden ikä mahdollistaa kloorin reagoimisen ja kulumisen. Joissakin maissa ei ylläpidetä verkostossa klooripitoisuutta ollenkaan kuten Alankomaissa, Tanskassa ja Sveitsissä. (Blokker et al. 2016)

Pintavesissä voi esiintyä suuriakin määriä humusta, kun taas pohjavesissä humusta on yleensä hyvin vähän. Kloori muodostaa luonnollisen orgaanisen materiaalin kanssa desinfioinnin sivutuotteita. Näitä ovat mm. klooratut furanonit, halogenoidut etikkahapot sekä trihalometaanit. Desinfioinnin sivutuotteet ovat yleisesti karsinogeenisia ja teratogeeneja (Kloorauksen sivutuotteet). Tämän takia on hyvin tärkeää poistaa luonnollinen orgaaninen materiaali vedenpuhdistuslaitoksella, mutta yleensä sitä ei saada poistumaan kokonaan.

(Committee on Indicators for Waterborne Pathogens 2004):n mukaan osaa juomavedestä aiheutuneista sairastapauksista ei rekisteröidä veden aiheuttamaksi, sillä ne eivät aiheuta isoa epidemiaa vaan vain muutamia sairastapauksia, eikä sairauksia näin ollen liitetä veteen. Vuosina 1991 sekä 1997 tehdyt tutkimukset Kanadassa osoittivat yhteyden juomaveden ja sairaustapausten välillä niin kutsuttujen endeemisten tautien osalta, mutta kyseisiä tuloksia ei ole pystytty toistamaan muissa tutkimuksissa, jonka takia asiasta ei ole olemassa tieteellistä konsensusta (Committee on Indicators for Waterborne Pathogens 2004).

Joidenkin arvioiden mukaan Suomessa legionella on selvästi alidiagnosoitu tautimuoto, ja jopa sata legionellatartuntaa jää vuosittain toteamatta. Sitä ei testata kaikista keuhkokuumeista, jonka takia se jää monesti huomaamatta. Legionellalle alttiimpia ihmisryhmiä ovat vanhukset ja heikkokuntoiset, jonka takia sitä ei monesti lähdetä diagnosoimaan. Legionellan aiheuttaman keuhkokuumeen kuolleisuus on Euroopassa 8-10 % sairastuneista. Legionella voi olla pneumokokin jälkeen toiseksi yleisin aiheuttajabakteeri kuolemaan johtavissa keuhkokuumeissa Suomessa. Legionellaa esiintyy normaalisti luonnossa järvissä ja joissa, jossa se kuitenkin esiintyy melko pieninä pitoisuuksina, eikä näin aiheuta sairastumistapauksia. Vesijohtoverkostoon päästessään se voi löytää sopivat olosuhteet lisääntymiselle ja voi muodostaa vaaran ihmisille. Kyseisen bakteeritartunnan voi saada hengitysteiden kautta, kun ihminen hengittää ilmaa, jossa on pieniä vesipisaroita. (Räihä 2018). Euroopan komissio antoi vuonna 2018 esityksen uudesta juomavesidirektiivistä, jossa esitetään riskikiinteistöjen kuten sairaaloiden, terveydenhuollon toimintayksiköiden, majoitustilojen ja vankiloiden vesijärjestelmien riskianalyysejä ja säännöllistä seuranta. (Rapala)

2.4 Vesijohtoverkoston vaikutus vedenlaatuun

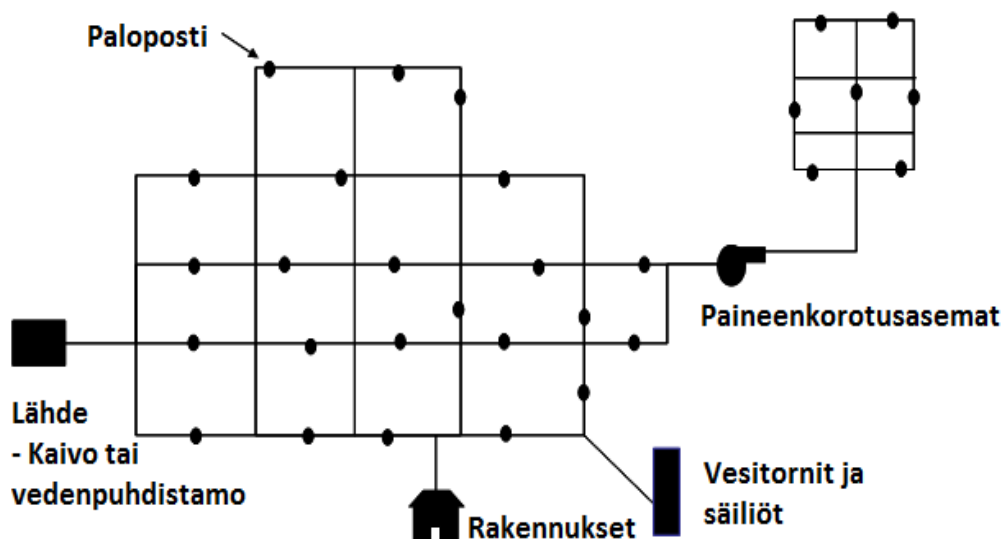
Vesilaitoksilla ei useinkaan ole mahdollisuutta havaita vedenlaadun äkillistä muutosta vesijohtoverkostossa. Tekijät, jotka huonontavat vedenjakelujärjestelmässä vedenlaatua ovat muun muassa:

- jakelujärjestelmään syötetyn veden puutteellinen käsittely
- putkirikot
- biokemialliset muutokset putkistossa tai vesisäiliössä
- fysikaalis-kemialliset muutokset putkistossa tai vesisäiliössä
- käyttäjien laitteistoista tapahtuva takaisinvirtaus

Verkostoa voidaan manuaalisesti huuhdella väliaikaisesti jonkin putken tai alueen puhdistamiseksi. Tämä onnistuu esimerkiksi palopostista tai kiinteistön sisältä. Jatkuva pitkäaikaista hyvin pienellä vesimäärällä tapahtuvaa huuhtelua nimitetään juoksutukseksi. Sen tavoite on yleensä vedenlaadun parantaminen estämällä veden seisomista putkistojen umpipäissä ja sillä voidaan myös estää putkien jäätymistä. (Karttunen 2010)

Yhdysvalloissa 1980-luvulta lähtien vesiepidemioiden kokonaismäärä on vähentynyt huomattavasti, mutta vesijohtoverkostoissa aiheutuneet epidemiat ovat suhteessa lisääntyneet. Suurin osa vesijohtoverkostoissa johtuneista epidemioista aiheutuivat ristikytkenästä ja takaisinvirtauksesta. Loput johtuivat vesisäiliöiden saastumisesta, päävesiputkien rikkoutumisesta tai niiden korjauksen aikana tapahtuneesta kontaminaatiosta (Committee on Public Water Supply Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks & National Research Council 2006).

Vesijohtoverkostossa on mahdollista sattua kontaminaatio monessa eri pisteessä verkostoa kuten asuinrakennuksista, paineenkorotuspumppaamoista, paloposteista, vesitorneista ja säiliöistä (Kuva 2). Verkostoon on mahdollista tulla saastunutta vettä vedenpuhdistamolta, mutta yleensä vesilaitokset mittaavat vedenpuhdistamoiden tuottamaa ja verkostoon pumpattavaa vedenlaatua systemaattisesti.



Kuva 2. Mahdollisia kontaminantin sisäänpääsypisteitä verkostoon.

Vesijohtoverkosto ei ole normaalioloissa altis kontaminaatiolle, sillä verkostossa oleva paine aiheuttaa sen, että veden ei ole mahdollista virrata putkeen sisälle. Kuitenkin verkostossa tapahtuu painemuutoksia ja putkirikkoja, joita ei ole mahdollista estää kokonaan, joten vesijohtoverkostossa on olemassa aina mahdollisuus kontaminaatiolle.

2.4.1 Saostumat ja biofilmi

Vesijohtoverkostossa putkien pinnoille kertyy hitaasti eri aineita kuten rautaa, mangaania, orgaanista ainetta ja mikrobeja. Kertymisen määrään vaikuttavat virtausolosuhteet, putkimateriaali sekä vedenlaatu. Saostumat voivat lähteä liikkeelle paineiskun tai äkillisen virtausolosuhteen muutoksen takia. Tällöin vedenlaatu heikkenee voimakkaasti. Sa-

ostumien aiheuttamat teknis-esteettiset haitat ovat yksi merkittävimmistä verkostoveden laadun muutosten syistä. Saostumien liikkeellelähtö näkyy usein veden sameuden kasvuna ja ruskeana tai keltaisena värinä. Tällöin myös veden mangaani-, hiili-, fosfori-, rauta-, sekä mikrobipitoisuudet ovat usein hetkellisesti kohonneet. Veden sameus ja värihäiriöt ovat yleisin syy kuluttajien häiriöilmoituksille.

Vesijohtoverkostossa oleviin saostumiin ja biofilmeihin on kertynyt suurin osa verkoston mikrobeista. Verkoston mikrobikasvun kannalta tärkeimpiä paikkoja kasvulle ovat putkien sisäpinnoilla kasvavat biofilmit. Biofimien muodostumiseen vaikuttavat muun muassa lämpötila, desinfiointi, putkimateriaali, veden ravinteet ja virtausolosuhteet. Biofilmit voivat tarjota suoja- ja kasvupaikan maku- ja hajuhaittoja veteen tekeville mikrobeille sekä patogeeneille, sillä biofilmeissä mikrobit ovat paremmin suojassa desinfioinnilta ja niiden ravinnon saanti on myös turvatumpi (Zacheus et al. 2001). Metalliputket ovat suotuisampia biofilmien muodostumiselle mm. korroosion takia, sillä korroosio saattaa kuluttaa desinfioinnin jäännöistä verkostossa, jolloin desinfioinnin jäännöistä ei ole tarpeeksi biofimien estämiseen. Muoviputkiin muodostuu myös samalla tavalla biofilmejä, mutta hitaammin (Karttunen 2010).

Saostumien liikkeellelähtö ei aiheuta aina vaaraa käyttäjille, mutta joskus sen mukana voi lähteä biofilmiä ja siinä kasvaneita patogeeneja. Normaalitilanteessa vedessä olevan mikrobien määrä ei välttämättä korreloi biofilmeissä esiintyviin määriin, eli verkostossa jossa on vähän mikrobeja normaalisti voi kuitenkin esiintyä mittavia biofilmejä. Bakteerien määrä vedessä yleensä korreloi veden sameuden ja vedessä olevan partikkelien määrän kanssa (Mustonen et al. 2008).

3. AIKAISET VAROITUSJÄRJESTELMÄT

Aikaisen varoitusjärjestelmän tarkoituksena on havaita kontaminaatio ajoissa ja näin antaa vesilaitokselle mahdollisuus vähentää haittoja kuluttajien terveydelle sekä taloudellisia haittavaikutuksia. Tärkein rooli tehokkaassa reagoinnissa kontaminaatiotapaukseen on ajan minimointi kontaminaation havaitsemista toimiin ryhtymiseen. Aikainen varoitusjärjestelmä voi toteuttaa tämän tavoitteen antamalla aikaisemman tiedon mahdollisesta kontaminaatiosta kuin mitä perinteisesti olisi mahdollista saada. Kyseinen järjestelmä on ennaltaehkäisevä lähestymistapa, joka käyttää sensoriteknologiaa ja tehostettuja valvontatoimia kerätäkseen, yhdistääkseen ja analysoidakseen informaatiota, tavoitteenaan tuottaa tarkoituksenmukainen varoitus mahdollisimman nopeasti kontaminaatiotapauksesta. Vedenlaadun jatkuvatoimisella mittaamisella vesijohtoverkostossa saatuja hyötyjä ovat muun muassa (Lee et al. 2012):

- vähentää riskejä kansanterveydelle havaitsemalla huonolaatuinen vesi aikaisin
- lainsäädännöllisten vaatimusten kohtaaminen
- auttaa päätöksenteossa verkostoa koskevissa asioissa
- lisää kuluttajien luottamusta ja vähentää riskin kuvitelmia
- vesilaitosten kemikaalien lisäyksen optimointi
- luoda vedenlaadun lähtöarvoja perustilanteessa
- luoda mahdollisuudet ennakoivaan lähestymistapaan verkoston vedenlaadun kasvaviin ongelmiin

2000-luvulla laitteet ja tekniikat kontaminaation havaitsemiseksi vedenlaadun mittauksen avulla ovat edistyneet. Tarvitaan kuitenkin kehitystä kunnes laitteet ja tekniikat ovat valmiita käytettäväksi isommassa skaalassa esimerkiksi vesijohtoverkostossa (Storey et al. 2011; Lee et al. 2012).

Aikaiset varoitusjärjestelmät ovat yleensä integroituja järjestelmiä sisältäen mittauslaitteiston, joka pystyy analysoimaan ja tulkitsemaan tuloksia reaaliaikaisesti. Aikaisen varoitusjärjestelmän tarkoitus on tunnistaa epätodennäköisiä, mutta laajuudeltaan isoja tapahtumia riittävissä ajassa, jotta veden käyttäjille ei aiheutuisi vaaraa. Kyseisten varoitusjärjestelmien tulisi erottaa nopeasti ja tarkasti vedenlaadussa tapahtuvat normaalit variaatiot ja kontaminaatiotapahtumat, riippumatta niiden alkuperästä tai ovatko ne tahallisia tai tahattomia. Niiden tulisi myös toimia varmasti, tuottaen mahdollisimman vähän virheellisiä esiintymiä, olla halpoja, helposti huollettavia ja integroitavia verkostoon. (Storey et al. 2011).

Tehokas aikainen varoitusjärjestelmä on systeemi, joka sisältää instrumentoinnin, tulosten analysoinnin ja tulkinnan, sekä tuloksia hyödyntäen tekee päätöksiä, jotka suojaavat

käyttäjien terveyttä. Optimaalisen aikaisen varoitusjärjestelmän voi kiteyttää (Umberg et al. 2014):

- monipuolisuus havaita suuri skaala epäpuhtauksia
- kattaa ison osan verkostosta tai ainakin ne osat, mihin asukkaat ovat keskittyneet
- nopea veden kontaminaation havaitsemisesta diagnosointiin
- automatisoitu ja etäyhteydellä toimiva

Väärät hälytykset vaikeuttavat jatkuvatoimista mittausta. Väärien hälytysten minimoiminen on yksi priorisoinnin kohde, sillä ne tuhlaavat resursseja. Erityisesti päättelyyn perustuva järjestelmä ei ole turvassa vääriltä hälytyksiltä. Hälytyksen voi aiheuttaa vedessä tapahtunut laadullinen muutos, näytteenkeruujärjestelmä tai itse mittauslaitteisto. Virheiden syiden huomioimiseen ja poistamiseen on tärkeää suhtautua systemaattisesti ja luoda ohjeet, miten toimia erilaisissa tilanteissa. Tärkeitä asioita joihin kiinnittää huomiota mitaustuloksissa ovat datan erilaiset luonnolliset kuviot kuten signaalin magnitudi, muoto ja kesto. (Kroll 2011; Aksela 2012)

Mittalaitteet voivat olla herkkiä tietyille olosuhteille verkostossa, mitkä saattavat heikentää laitteiden mittaustarkkuutta. Näitä olosuhteita ovat muun muassa painenvaihtelut, virtauksen muutokset, kuplien muodostuminen ja korkea pH:n arvo. Jotkin laitteet voivat vaatia paineentasausventtiilin toimiakseen luotettavasti. Jotta huolto ei olisi huomattavan vaativaa, tulisi mittalaitteen toimia ilman kemiallisia reagensseja. Laitteistoissa olisi myös hyvä olla sisäänrakennettu uudelleenikäynnistämisen mekanismi toimintahäiriöiden vuoksi (Panguluri et al. 2009). Mittalaitteen valintaan vaikuttavat fyysiset ominaisuudet kuten etäluettavuuden toimivuus ja mitä parametreja laite mittaa. Valintaan vaikuttavat myös huolto-ominaisuudet kuten kalibroitireagenssin kuluminen ja kalibroinnin taajuus, puhdistusreagenssin kuluminen ja puhdistuksen taajuus, erinäisten osien ja kulumistarvikkeiden korvaaminen sekä mittauksen resoluutio, varmuus, arvoasteikko, vasteaika ja tarkkuus.

3.1 Älykäs vesijohtoverkosto

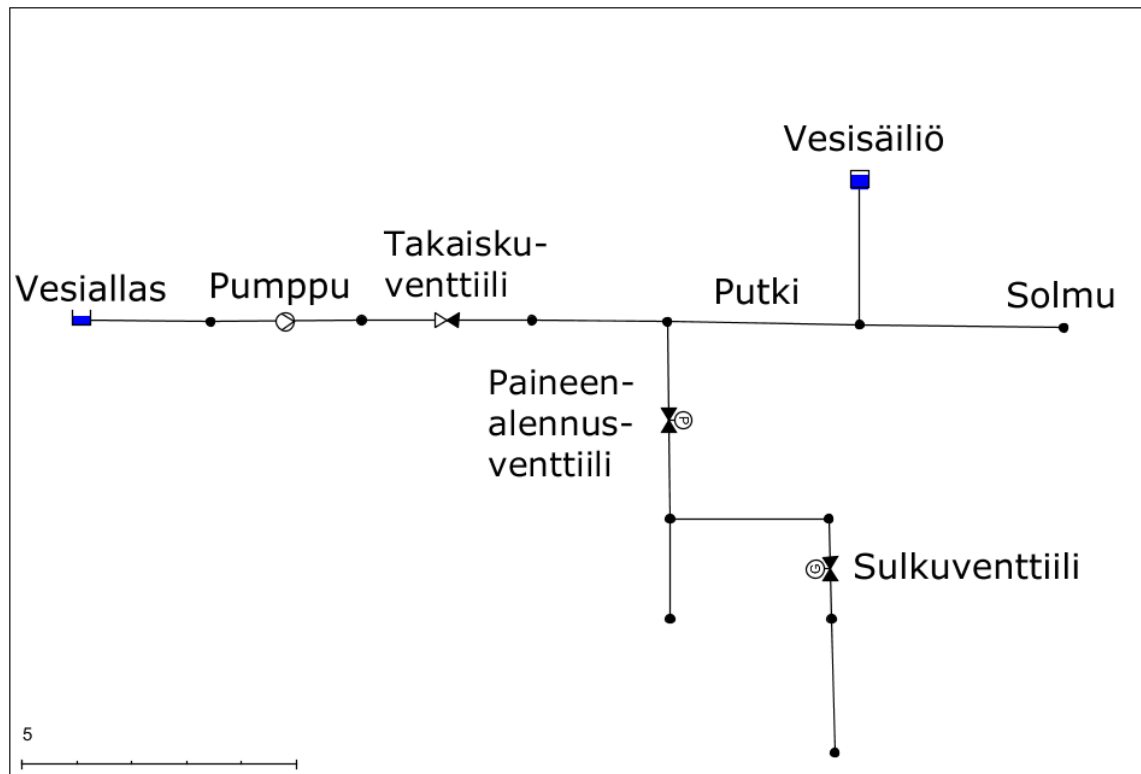
Älykäs vesijohtoverkosto tarkoittaa informaatioteknologian käyttöä vesijohtoverkoston hallinnassa. Älykkäässä vesijohtoverkossa mitataan monia eri parametreja kuten painetta, virtausta ja vedenlaatua, joista tieto voidaan saada reaaliaikaisesti tai viiveellä analysoitavaksi ja näytettäväksi. Tällöin olisi mahdollista saada tietoa verkoston perustoiminnasta sekä kohdentaa verkostossa olevien vuotojen sijaintia. Se vähentäisi myös erikoistilanteisiin kuten veden saastumiseen tai isojen vuotojen reagoimiseen vaadittavaa aikaa merkittävästi. Älykäs vesijohtoverkosto tekee verkoston hallinnasta ja tarkkailusta helpompaa sekä mahdollistaa myös vedenpuhdistuslaitosten kemikaalien ja energian säästämisen vähentämällä vuotoja. Älykkään vesijohtoverkoston isoin haittapuoli on sen alkuinvestoinnin kalleus. (Martyusheva 2014; Cheong et al. 2016)

Uusiin investointeihin keskittyminen ja raakaveden runsauden takia vesijohtoverkostojen huolto ja saneeraus on ollut Suomessa puutteellista. Tämän seurauksena vuotoveden määrä on kasvanut paikoin korkeaksi sekä putkirikot yleistyneet (Aksela 2012). Viimeaikainen kehitys tietojärjestelmissä ja mittauksen saralla ovat avanneet uusia mahdollisuuksia verkostojen hydraulisen hallinnan osalta. Tärkeä osa älykästä vesijohtoverkostoa ovat etäluettavat vesimittarit, joiden avulla vesilaitos voi reaaliaikaisesti tai lähes reaaliaikaisesti tietää sen hetkisen veden tarpeen verkoston eri osissa. Tiedon tarkkuus riippuu mittareiden resoluutiosta ja taajuudesta (Cheong et al. 2016). Vesimittareiden etäluenta antaa myös käyttäjille mahdollisuuden tunnistaa omia vedenkäytön tapojaan ja havaita kiinteistön sisällä tapahtuvat vesijohtovuodot nopeasti esimerkiksi puhelimen applikaation avulla. Suomessa tapahtuu yli 100 vesivahinkoa päivittäin ja niistä vakuutusyhtiöiden maksamat korvaukset vuodessa ovat noin 157 miljoonaa euroa, joten niiden vähentämiselle on kova tarve (Vesivahinko - ennaltaehkäistävä painajainen). Etäluettavat vesimittarit helpottavat myös asiakkaiden laskuttamista vesilaitoksen toimesta, poistamalla normaalisti käytettäviä arviointimenetelmiä. Vesimittarin yhteyteen olisi teoriassa mahdollista liittää vedenlaatua mittaavia sensoreita. Osassa nykyisiä vesimittareita on mahdollisuus mitata veden lämpötilaa, jolla voidaan antaa asiakkaalle tietoa mittarin mahdollisesta jäätymisestä.

3.2 Verkoston mallinnus

Vesijohtoverkostoa on mahdollista mallintaa tietokoneohjelmilla. Tämä mahdollistaa verkstoveden hydraulisen ja laadullisen mallintamisen, mitä voidaan käyttää verkoston saneerauksen suunnittelussa ja uusien alueiden putkien ja pumppujen mitoittamisessa. Sillä on myös mahdollista tarkastella erikoistilanteiden kuten putkirikkojen ja sammutusveden oton vaikutusta verkoston toimintaan. Mallinnusohjelmilla on mahdollista tarkastella veden laadullisia ominaisuuksia kuten esimerkiksi veden ikää tai kloorin leviämistä verkostossa. Verkstomalli on tarpeen aikaista varoitusjärjestelmää suunniteltaessa.

Vedenjakelujärjestelmän malli rakentuu solmuista ja linkeistä. Solmut kuvaavat putkien risteyskohtia, vesisäiliöitä sekä putkien koon tai materiaalin muutoskohtia (Kuva 3). Osaa ohjelman tuloksista kuten painetietoja saadaan vain solmujen kautta, joten solmujen sijoittaminen strategiaan paikkoihin esimerkiksi pitkillä linjoilla voi olla haluttavaa, vaikka putkessa ei sinänsä olekaan fyysistä muutosta koko matkalla. Linkki kuvaa mallissa putkia, venttilejä sekä pumppuja. Mallista vettä voi poistua pelkästään solmujen kautta, ja kiinteistöjen vedenkäyttö liitetään yleensä lähimpään solmuun, eikä jokaista tonttiliitosta mallinneta erikseen. (Walski 2003)



Kuva 3. Vesijohtoverkostomallin muodostaviyleisiä komponentteja.

Verkostomallinnuksessa on mahdollista suorittaa stationaarisimulointi tai aikajatkuvaa simulointi. Stationaarisimulointi kuvaa verkoston tilaa yhdellä tietyllä hetkellä ja sillä on mahdollista saada tietoa verkoston paineista ja virtauksista. Aikajatkuvaa simulointi mahdollistaa verkoston toiminnan tarkemman tarkastelun. Sillä voidaan kalibroida verkostoa, eli varmentaa sen toiminta todellisuutta vastaavaksi, sekä tehdä erilaisia tarkasteluja häiriötilanteiden varalta. Vedenlaadulliset mallinnukset toteutetaan aikajatkuvalla simuloinnilla. (Walski 2003)

EPANET on Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston tekemä julkisohjelma, joka toimii perustana suurimmalle osalle kaupallisista vesijohtoverkoston mallinnussovelluksista. Yleisesti vesilaitokset eivät käytä EPANET-ohjelmaa verkostojen mallintamiseen, vaan hyödyntävät jotakin kaupallista sovellusta. Näistä sovelluksista on kuitenkin yleensä mahdollista ottaa EPANET perusmalli ulos, jolloin se toimii EPANETissä, mutta jotkin mallin osat eivät välttämättä toimi, jolloin voi olla tarpeen korjata mallia käyttäessä ohjelmia ristiin. EPANET-malli on hyvä tarkastaa aikajatkuvalla simuloinnilla, että se toimii pitempiaikaisesti. Sopiva pituus aikajatkuvalla simuloinnille riippuu kyseessä olevan verkoston koosta ja toiminnasta, mutta sen tulisi olla monta päivää jopa yksi viikko. Tällöin verkostosta näkee, pysyykö se tasapainossa, eli vesitornien vedenpinnat eivät järjestelmällisesti nouse tai laske, vaan ne olisivat joka päivä suunnilleen samat. Verkostomallissa on myös tärkeää, että se olisi edustava verkoston normaalista tilanteesta. Kontaminaatio voi sattua milloin vain ja ideaalisesti olisi hyvä tarkastella monia eri verkoston vedenkulutuksen skenaarioita kuten minimi-, normaali- ja maksimikulutusta, ja verrata

mallin antamia sensoreiden sijaintiin liittyviä tuloksia toisiinsa. Vähintään olisi tarkasteltava normaalia vedenkulutuksen tilannetta, sillä se on ajallisesti yleisin verkostossa, ja välttää pelkästään minimi- tai maksimikulutuksen tarkastelua. (Janke et al. 2012)

Useimmissa vesijohtoverkostojen malleissa ei ole kaikkia verkoston putkia. Mallissa ei tarvitse olla kaikkia verkoston pienempiä putkia, mutta olisi kuitenkin hyvä olla vähintään kaikki 150 mm halkaisijaltaan olevat putket sekä tärkeimmät pienemmät putket, joiden tiedetään välittävän paljon vettä. Vesisäiliöt, käytössä olevat pumput ja venttiilit sekä kaikki muut verkoston osat, jotka vaikuttavat merkittävästi veden kulkuun, tulisi olla mallissa. Mallin yksinkertaistaminen saattaa vaikuttaa tuloksiin. (Janke & Davis 2015)

Veden liikkuminen verkostossa aiheutuu suurimmaksi osaksi veden kulutuksesta eri kohdissa verkostoa. Veden kulutus vaihtelee vuorokauden aikana ja suurimpina kulutuksen aikoina veden virtaamat ja nopeudet putkissa ovat yleisesti suuremmat. Kulutusmallit ovat yleensä päivittäin toistuvia ja niitä voi olla esimerkiksi jokaiselle painepiirille tai kotitalouksille ja teollisuudelle omansa. Mallin luomisen jälkeen se tulee kalibroida, jotta se vastaa todellisuutta. Tämä onnistuu tarkastelemalla verkostoa eri menetelmin ja säätämällä mallin eri osien lähtöarvoja. Mallin tuloksia erityisesti paineista, virtaamista ja vesisäiliöiden pinnan vaihteluista tulisi tarkastella vertaamalla niitä verkoston todellisiin mitattuihin arvoihin. Mallin käytössä tehdään oletus, että malli on todellisuutta vastaava. Jos mallissa on esimerkiksi jotkin venttiilit merkitty kiinni oleviksi, mutta ne ovatkin todellisuudessa auki, voi se vaikuttaa huomattavasti mallin antamiin tuloksiin vääristäen niitä. (Walski 2003)

Saastunut vesi voi levitä vain alavirtaan, jolloin virtauksen tutkimisella voidaan rajata mahdollisesti saastuva alue. On tärkeää ottaa huomioon alueita tutkittaessa, että kun veden kuluttajille annetaan tiedotus veden keittämisestä tai kokonaan juomisen välttämisestä, niin kulutus kyseisillä alueilla laskee huomattavasti. Tämä voi johtaa siihen, että vesi virtaa alueisiin tai putkiin, joihin se ei normaalisti virtaa. Näin ollen mallien antamat tulokset voivat olla vääristyneitä todellisuudesta. (Nazarovs et al. 2012)

3.3 Indikaattoriparametreihin perustuvat mittausmenetelmät

Jokaisen vedenlaadullisen parametrin mittaaminen vedestä ei ole realistista, minkä takia yksi yleinen aikaisen varoitusjärjestelmän menetelmä on mitata montaa eri vedenlaadun fysikaalista ja kemiallista parametria, joiden laadullisesta vaihtelusta päätellään eri kontaminanttien esiintymisen mahdollisuutta. Näitä parametreja kutsutaan vedenlaadun indikaattoreiksi. Indikaattoriparametreja tutkimalla voidaan saada tietoa mahdollisesta vedenlaadun heikentymisestä sekä vaikeasti määritettävistä terveydelle haitallisista aineista. (Kroll 2011)

Vedenlaadun indikaattoriparametrien valitseminen riippuu lainsäädännöllisistä ohjesäännöistä ja paikallisista syistä kuten raakavesilähteestä, vedenpuhdistuslaitoksen prosesseista ja vesijohtoverkoston ominaisuuksista. Näin ollen eri vesilaitoksilla voi usein olla hyödyllistä mitata eri parametreja. Vedenlaadun jatkuvatoiminen mittaus voi toimia aikaisena varoitusjärjestelmänä sekä täydentää lainsäädännöllistä määräystenmukaisuutta, antaen vesilaitoksille mahdollisuuden parantaa juomaveden turvallisuutta. Mahdollisia mitattavia vedenlaadun parametreja on useita (Taulukko 1).

Taulukko 1. Mahdollisia mitattavia indikaattoriparametreja (Panguluri et al. 2009).

Indikaattoriparametri
pH
Sameus
Lämpötila
Sähkönjohtavuus
Redox potentiaali
Vapaa kloori
Kloridi
Happipitoisuus
Nitraatti - typpi
Ammoniakki - typpi
Orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC)

Muun muassa vapaan kloorin, pH:n, orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC), sähkönjohtavuuden ja lämpötilan mittaamista jatkuvatoimisesti vedestä pidetään luotettavimpina menetelminä havaita muutoksia vedenlaadussa. Laseriin perustuvat teknologiat partikkelien mittaamiseen ovat lupaavia ja niitä käyttäviä laitteita on käytössä joissakin kohteissa Yhdysvalloissa (Storey et al. 2011).

Jäännöskloorin ja orgaanisen hiilen kokonaismäärä (TOC) mittaaminen reagoi parhaiten isoon skaalaan epäpuhtauksia verkostossa, jolloin niillä on mahdollista havaita mahdollisimman monia erilaisia kontaminaatiotapauksia (Murra et al. 2010). (Aksela 2012):n lopuraportissa suositellaan veden peruslaadun mittauksia siten, että vesilaitos valitsisi 2-4 parametria seuraavista: pH, lämpötila, jäännöskloori, sameus, redoxpotentiaali ja UV-absorbanssi. Jokaisessa mittauskohteessa olisi hyvä mitata samoja parametreja, jotta ne olisivat vertailukelpoisia keskenään. Osaa parametreista olisi hyvä mitata myös vesilaitokselta lähtevässä vedessä. Mikrobien kannalta sameuden mittaus voi antaa virheellisiä esiintymiä tai mikrobit voivat jäädä huomaamatta. Sameutta voidaan pitää hyvänä indikaattorina abioottisista partikkeleista, mutta se ei välttämättä korreloi mikrobien määrän kanssa. Sameusmittaus ei ole yhtä herkkä havaitsemaan talousveden kontaminaatiota kuin partikkelien laskenta. Mikrobikontaminaation tapauksessa pitää veden likaantumisen olla merkittävä ennen kuin se voidaan havaita jatkuvatoimisilla mittareilla (Aksela 2012).

Esimerkkinä indikaattoriparametreja käyttävästä systeemistä on GuardianBlue aikainen varoitusjärjestelmä. Se on ainut vesijohtoverkostoille tarkoitettu systeemi, jolla on Yhdysvaltain Department of Homeland Securityn sertifikaatti. Laite on hyväksytty terrorismin vastaiseksi teknologiaksi. Sertifikaatti perustuu kolmen vuoden testauksiin. Järjestelmä perustuu luotuihin kirjastoihin, jotka sisältävät monen kontaminantin ”sormenjälkitunnisteen”. Sormenjälkitunniste tarkoittaa mitattujen parametrien muutosta vedenlaadun perustilasta. Tällöin laitteisto pystyy luokittelemaan kontaminantin tarkasti vedenlaadun muutosten perusteella (Panguluri et al. 2009). Järjestelmä mittaa veden lämpötilaa, vapaata tai kokonaisklooria, pH:ta, sameutta sekä sähkönjohtavuutta (Kuva 4). Orgaanisen hiilen kokonaismäärän mittaamiselle on oma laitteistonsa. Näiden parametrien avulla laite seuraa vedenlaadullisia muutoksia sen todetusta perusarvosta. Osana mittauslaitesysteemiä on automaattinen näytteenotin, joka toimii aina varoituksen tapahtuessa. Tämä mahdollistaa käyttäjien lisätutkimukset mahdollisen kontaminantin identifioimiseksi.



Kuva 4. GuardianBlue aikaisen varoitusjärjestelmän eri osat.

Kyseinen systeemi mittaa vedenlaatua minuutin välein ja välittää tietoa reaaliaikaisesti systeemin operoijalle. (GUARDIANBLUE™ - Early Warning System - 2007)

3.4 Spesifisiä mikrobiologisen laadun mittausmenetelmiä

Vedenlaatua voidaan tutkia spesifisillä menetelmillä kuten partikkelien lukumäärän laskemisella tai partikkelien koon ja muodon perusteella tunnistamisella. Mikrobin aiheuttama haitta juomavedessä on usein todennäköisempää kuin kemiallisten aineiden, sillä mikrobikontaminaatio voi olla hyvin nopeasti aiheutunut ulkoisista tekijöistä johtuen.

Laitteet voivat kertoa mikrobien esiintymisestä päivän eri kellonaikoina, jolloin näytteenoton hetkeä voidaan kohdentaa ja mahdollistaa täsmällisemmän selvityksen tekeminen. Virtaussytometriaa ja adenosiinitrifosfaatin esiintymistä vedessä on pidetty lupaavina menetelminä veden mikrobiologisen tilan selvittämiseksi, mutta näillä keinoilla huollon yleisyys on ongelma (Hojris et al. 2016). Bakteerien kasvuun perustuvat menetelmät ovat hitaita mutta spesifisiä, toisin kuin reaaliaikaisesti veden fysikaalisia ja kemiallisia parametreja mittaavat laitteet eivät ole spesifisiä. Veden mikrobiologista laatua tutkivilla laitteilla on yleensä huono havaintokyky ja ne eivät pysty havaitsemaan suhteellisen pieniä määriä mikrobeja vedessä, jotka toisin kuin kemikaalit eivät ole tasaisesti jakautuneet veteen (Storey et al. 2011).

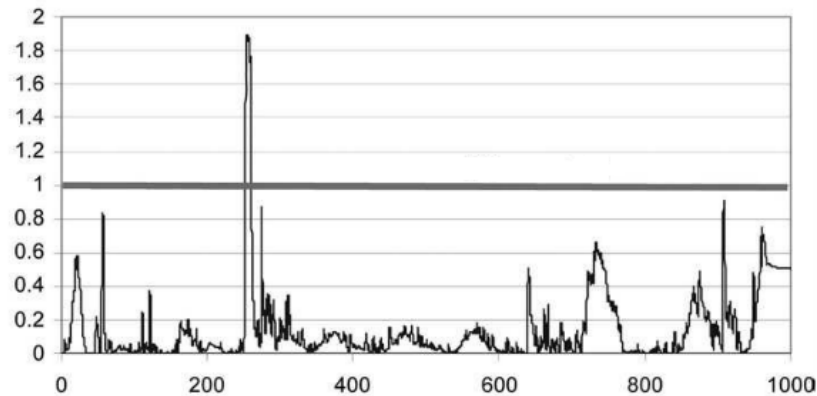
Yksi esimerkki veden mikrobiologisen laadun jatkuvatoimiseen tutkimiseen tarkoitettu laitteesta on Biosentry. Se tutkii vettä mittaamalla partikkelien lukumäärää, niiden kokoa sekä muotoa, mikä perustuu laserin avulla tuotettuun monikulma-valonsirontaan (multi-angle light scattering). Laitteeseen voidaan asettaa haluttu mittaustiheys sekä näytteenottoraja erilaisille partikkeleiden muodoille kuten alkueläimille, itiöillisille bakteereille sekä sauvabakteereille. Biosentry -laite kykenee havaitsemaan veden mikrobiologisia laatu-muutoksia, mutta se toimii vaihtelevasti (Ikonen 2013):n tutkimuksen mukaan. Yhdysvaltain ympäristöviranomaisten testeissä laite havaitsi luotettavasti tutkittuja biologisia kontaminantteja (*E. coli*, *B. globigii* sekä *Cryptosporidium* spp:n korvikkeena toimivat saman kokoiset muovipartikkelit). Biosentry pystyi havaitsemaan luotettavasti partikkeleita, joiden konsentraatio tutkitussa vedessä oli välillä 1 000 – 10 000 solua/mL. Tätä pienemmillä konsentraatioilla laitteen havaintokyky ei ollut yhteneväinen. (Panguluri et al. 2009)

3.5 Mittausaineiston tulkitseminen

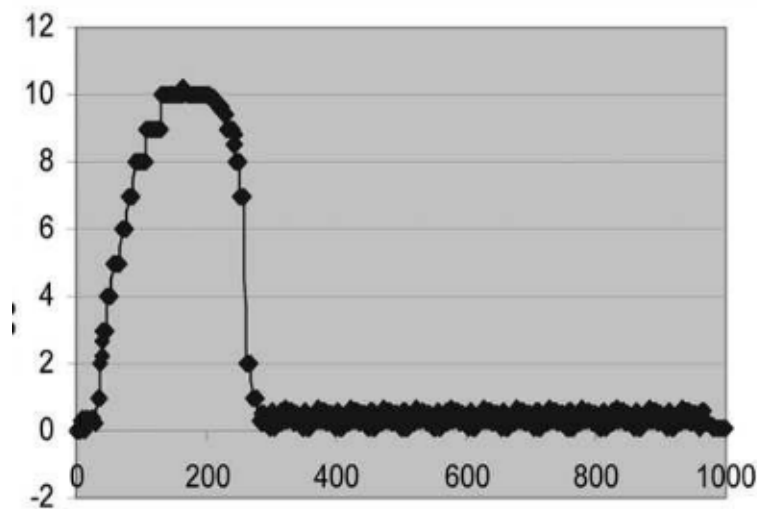
Aikaisen varoitusjärjestelmän tarkoitus vesijohtoverkostossa on antaa hälytys, jos veden laatu muuttuu jonkun tutkitun parametrin kohdalla tarpeeksi paljon. Joissakin ohjelmitoissa on mahdollista integroida tietynlainen kirjasto hälytysten tunnistamiseksi. Tällöin mittauksessa saatuja vedenlaadullisia vaihteluita verrataan kirjastossa oleviin valmiisiin malleihin ja saadaan mahdollinen tulos. Tällaiset systeemit pystyvät vain oletuksiin kirjaston avulla, joten käyttäjän pitää olla kokenut varmistamaan tai tulkitsemaan erikoisia signaaleja. Kyseiset ohjelmistot siis tulkitsevat tietyn kontaminantin olemassaoloa vedessä signaaleista. Tämä on yleensä hyvä tapa kohdentaa jatkotutkimuksia. (Kroll 2011)

Mittauskäyrissä erilaiset lyhytkestoiset piikit (Kuva 5), jotka kuitenkin ylittävät säädetyt hälytysrajan, eivät ole niin huomioon otettavia, kuin pitkäkestoiset muutokset (Kuva 6), sillä silloin paljon suurempi vesimäärä on mahdollisesti saastunut. Pitempiaikainen piikki on myös epätodennäköisemmin mittalaitteen oma häiriö tai muu väärä tulos. Vaikuttava aine normaalisti aiheuttaa tunnuksenomaisen nousun ja tasaisen osan käyrän huipulle. Kun saastunut vesi on liikkunut mittalaitteiden ohi, mitattava konsentraatio laskee. On

mahdollista saada monia eri luokitteluja vaikuttavalle aineelle, mutta käyrän huipun tuottama luokittelu on kaikista varmin.



Kuva 5. Lyhytkestoinen piikki datassa (Kroll 2011).



Kuva 6. Pidempiaikainen piikki datassa (Kroll 2011).

Jatkuvatoimisten mittareiden testaaminen on tärkeää kohteessa, sillä jokaisen vesilaitoksen vedellä on omia ominaispiirteitä. Erilaista vettä on myös eri puolilla verkostoa riippuen miltä laitokselta vesi on tullut. Kunkin veden ominaispiirteet määrittelevät sen millaisia johtopäätelmiä mittaustuloksista voidaan tehdä. Jatkuvatoimisen mittauksen haasteita ovat virheelliset mittaustulokset, kohina, äkilliset muutokset datassa (piikit), mittaustatan suuri määrä ja sen laatu. (Kroll 2011; Aksela 2012)

Yksi tapa tulkita mittausaineistoa on antaa parametreille kynnyksarvoja (Taulukko 2). Nämä arvot ovat muutoksia suhteessa veden normaaliin laatuun. Näiden arvojen ylittyessä laite antaa hälytyksen.

Taulukko 2. USEPA:n kehittämät vedenlaadun kynnysarvot (Panguluri et al. 2009).

Vedenlaadun parametri	Kynnysarvo, joka määrittelee merkittävän muutoksen
Lämpötila	$\pm 0.15^{\circ}\text{C}$
Sähkönjohtavuuskyky	$> 5\%$ nousu
Happipitoisuus	$\pm 0.2 \text{ mg/l}$
Redox potentiaali	$\pm 20 \text{ mV}$
Nitraatti	$\pm 10\%$
Kloridi	$\pm 15\%$
Ammoniakki	$\pm 20\%$
Sameus	$> 200\%$ nousu
Vapaa kloori	$> 5\%$ lasku
Kokonaisorgaaninen hiili	$> 0.1 \text{ mg/l}$ nousu
pH	$\pm 0.5 \text{ pH unit}$

Nämä kynnysarvot ovat suuntaa antavia ja vesilaitosten kannattaa tuottaa omat vedenlaadulliset kynnysarvot riippuen parametrien perustasosta ja luonnollisista muutoksista. Tiettyissä kohteissa parametrit voivat muuttaa arvoaan nopeasti verkoston toiminnallisista syistä, kuten pumpun käynnistymisestä tai vesisäiliön käyttöönotosta. Parametreihin vaikuttavat myös päivittäiset ja kausittaiset vaihtelut. On tärkeää ottaa kyseiset asiat huomioon kynnysarvoja muodostaessa, jotta vääriä hälytyksiä välttyttäisiin (Panguluri et al. 2009). Joidenkin tutkimusten mukaan kynnysarvojen käyttö ei ole realistista vedenlaadun luonnollisten muutosten takia (Raich 2013).

Euroopassa laitteiden valmistajat ovat yleisesti kehittäneet oman algoritminsa datan ja tapahtumien tulkitsemiseksi, mutta Yhdysvalloissa Sandia National Laboratories yhteistyössä Yhdysvaltain ympäristöviranomaisten kanssa on kehittänyt avoimen lähdekoodin ohjelman nimeltä CANARY (Hart et al. 2012). Se käyttää matemaattisia ja tilastollisia tekniikoita vedenlaadun kontaminaation havaitsemiseksi mittausdatasta. CANARY käyttää vesilaitoksen historiallisia tietoja luodakseen tiettyjä trendejä ja oletettavia vedenlaadun muutoksia. Se oppii vedenlaadun luonnolliset muutokset käyttäjän vääriin hälytyksiin antamasta palautteesta. Ajan kuluessa CANARY-ohjelma pystyy tuottamaan huomattavasti vähemmän vääriä hälytyksiä datasta oppimisen seurauksena (Hart et al. 2012).

Umberg et al. (2014):n mukaan testeissä havaittu mediaani, missä ajassa CANARY tuottaa varoituksen (alkaen kontaminaation ensimmäisestä havaitsemisesta sensorilla) oli noin 1.5 tuntia.

Välittämättä siitä minkä tavan vesilaitos valitsee hallitakseen mittausaineistoa, protokollan luominen mittareiden antamien hälytysten varmistamiseen ja reagoititoimenpiteille varmistuneelle kontaminaatiolle on tärkeää. Kontaminaation havaintojärjestelmä voi myös antaa tavan valvoa verkoston normaalia toimintaa esimerkiksi mittaamalla jään-
nösklooria verkostossa. Tällä tiedolla voidaan parantaa vesilaitosten toimintaa, verkoston toimintaa, asiakaspalvelua sekä yleistä turvallisuutta (Panguluri et al. 2009).

3.6 Mittalaitteiden sijoittelun periaatteet

Tehokkaan sijoittamisen suunnittelu voidaan laatia optimisaatioon perustuvana mallina. Kirjallisuudessa on käsitelty monia eria malleja ja ratkaisualgoritmeja kuten kokonaislu-
kuohjelmointimenetelmä sekä kombinatorinen heuristiikka (Aral et al. 2010). Optimaaliseen sijoitteluun vaikuttaa suoraan valitut tavoitteet ja sen takia monesti valitaankin vain yksi kriteeri, jotta laskeminen helpottuu erityisesti isoimmilla vesilaitoksilla. Vaikka oikeasti verkostoon sijoitettavien mittareiden optimaalinen sijainti onkin monitavoitteinen tehtävä. Näitä tavoitteita ovat muun muassa (Janke et al. 2012):

- saastuneen veden käyttömäärän minimointi
- havaitsemiseen käytetyn ajan minimisointi
- havaitsemisen kattavuuden ja todennäköisyyden maksimointi
- saastuneen veden käyttäjien minimointi

Koska mittaus on kallista, on kriittistä määrittää mahdollisimman optimaaliset laitteiden paikat, jotta mittalaitteiden määrä voidaan mahdollisesti minimoida. USEPA on kehittänyt ohjelman nimeltä TEVA-SPOT, jota voidaan käyttää verkostoon sijoitettavien mittalaitteiden määrän ja sijainnin optimoimiseen (Janke et al. 2012).

Erilaisia kontaminantteja on lukemattomia ja ne käyttäytyvät verkostossa eri tavoilla. Jotkut kulkevat veden mukana ja näin niiden kulkeutumista on mahdollista mallintaa, kun taas toiset reagoivat desinfektioaineiden kanssa, kiinnittyvät biofilmeihin tai absorboituvat putken seinämiin. Tällöin niiden kulkeutumisen tarkastelu vaatii monimutkaisia malleja. Kontaminantin vaikutukset kuluttajien terveydelle ovat myös riippuvaisia kontaminantin ominaisuuksista ja vaativat olettamuksia ihmisten veden käyttötottumuksista. TEVA-SPOTissa on mahdollista mallintaa ihmisten veden juomisen tai suihkun käyttötottumusta valmiiksi luoduilla malleilla. (Janke et al. 2012)

Mittalaitteiden sijoittamiselle on olemassa fyysisiä vaatimuksia kuten tavoitettavuus, sähköverkkoon kytkemisen mahdollisuus, fyysinen turvallisuus, datan siirtomahdollisuus,

viemäröinti laitteen läpi menneelle vedelle ja sopiva lämpötila. Usein vesilaitos voi tunnistaa monia kohteita, jotka täyttävät kyseiset vaatimukset. Kohteita voisivat olla muun muassa pumppausasemat, vesisäiliöt, venttiiliasemat tai muut vesilaitoksen omistamat kohteet kuten jäteveden pumppausasemat. Uusia vesilaitoksen kohteita kuten jäteveden pumppausasemia suunniteltaessa olisi mahdollista ottaa huomioon tulevaisuuden tarve vedenlaadun mittaukselle kohteessa. Tämä voisi vaikuttaa tonttijohdon liitoskohdan päättämiseen ja tonttijohdon kokoon, tilan varaamiseen laitoksella ynnä muuhun. Muita kaupungin omistamia julkisia kohteita olisi myös mahdollista muokata käyttätarkoitukseen kuten kouluja, palolaitoksia, poliisiasemia ja toimistoja. Näissä kohteissa ongelmana voi olla pääsy mittarin luokse vuorokauden ympäri hälytyksen sattuessa. Mitä enemmän käytännössä toteutuskelpoisia sijainteja vesilaitoksella on käytettävissä, sitä paremmalla todennäköisyydellä sensoriverkosto on tehokas. Vesilaitoksen on mahdollista eritellä kohteet eri kategorioihin niiden helppokäyttöisyyden vuoksi ja vertailla kyseisiä kategorioita ja niistä saatuja hyötyjä sensoriverkoston toiminnalle esimerkiksi TEVA-SPOT-ohjelmalla. (Murra et al. 2010)

3.6.1 Mittalaitteiden sijoittelun optimointi

Threat Ensemble Vulnerability Assessment – Sensor Placement Optimization Tool (TEVA-SPOT) on luotu helpottamaan vesilaitoksia suorittamaan verkoston riskianalyysiä sekä vedenlaadun mittalaitteiden sijoittamisen optimoimiseksi. TEVA-SPOT ohjelman ovat luoneet yhteistyössä Yhdysvaltain ympäristönsuojeluvirasto, Sandia National Laboratories, Argonne National laboratory sekä Cincinnatin yliopisto. Se antaa käyttäjälle mahdollisuuden määritellä vesijohtoverkoston kontaminaatioskenaarioita, simuloida kontaminanttien leviämistä verkostossa, analysoida vaikutuksia sekä esittää tuloksia graafisesti ja taulokkomuodossa. Simuloinnin ja sen analyysin tarkoitus on määritellä vesijohtoverkoston riskiä kontaminaatiotapauksille sekä optimaalisen lukumäärän ja sijainnit vedenlaadun mittauslaitteille verkostossa, jolloin niillä voidaan vähentää kontaminaatioiden haittavaikutuksia. (Janke et al. 2012)

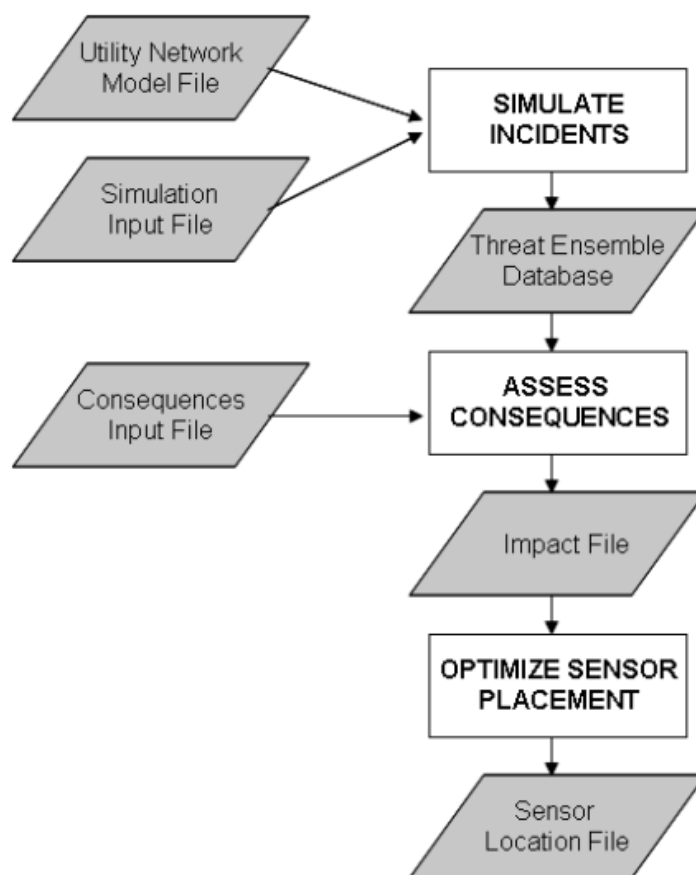
TEVA-SPOT-ohjelmasta on kehitetty kaksi eri versiota: TEVA-SPOT-toolkit ja TEVA-SPOT-GUI (graphical user interface). TEVA-SPOT toolkit tarjoaa mahdollisuuden käyttää ohjelmaa komentorivityökalun kautta ja soveltuu enemmän ohjelman kehittäjille tai tutkijoille. TEVA-SPOT-GUI tarjoaa graafisen käyttöliittymän, joka helpottaa sen käyttöä ja soveltuu enemmän vesilaitosten hyödynnettäväksi. TEVA-SPOT-GUI:hin ei ole viety kaikkia työkaluja ja laskentamenetelmiä, mitä löytyy TEVA-SPOT-toolkitistä. Molemmat versiot ovat vapaasti saatavilla USEPA:n verkkosivuilla. (Janke et al. 2012)

TEVA-SPOT käyttää EPANET ohjelmaa virtausten ja vedenlaadun simulointiin vesijohtoverkostossa ja vaatii verkostomallin tarkasteltavasta vesijohtoverkостosta toimiakseen. Vesijohtoverkoston mallin lisäksi tarvitaan muitakin lähtötietoja sensoreiden paikan määrittämisen optimointiin. Sensoreiden käytös ja ominaisuudet tulisi tietää ennalta, jotta aikaisen varoitusjärjestelmän suorituskykyä voitaisiin ennustaa. Erityisesti olisi hyvä tietää

mittalaitteen tyypit, havaitsemisrajat ja tarkkuudet. Ideaalisti mittalaitteet toimivat 100 % varmuudella ja havaitsevat kaikki konsentraatiot ilman alarajaa. Todellisuudessa näin ei ole, mutta mallinnettaessa aikaista varoitusjärjestelmää yleensä oletetaan, että mittalaitteet havaitsevat aina kontaminaation. Voi olla realistisempaa olettaa jokin ala-arvo, jonka yläpuolella mittalaite havaitsee konsentraation aina, mutta sen alapuolella ei koskaan. Tämä kuvastaa mittalaitteiden todellista kykyä havaita vain tietyn pitoiset konsentraatiot. Jotta mittalaitteelle voitaisiin määrittää mittauksen alaraja, olisi tiedettävä mittalaitteen tyyppi sekä systeemissä käytetty desinfiointitapa. On myös mahdollista käyttää mittalaitteen toiminnan todennäköisyyttä, sillä mikään laite ei ole sataprosenttisen luotettava, mutta tietokoneille sen käyttö muodostaa ongelman, sillä se vaikeuttaa optimoinnin laskemista huomattavasti. Tavallisesti vedenlaadun mittausrakenteet ovat herkempiä veden laatu muutoksille, jos kloorauksessa on käytetty klooria eikä klooriamiinia. Erityisesti jännöskloorin mittaaminen verkostossa, jota on kloorattu klooriamiinilla, ei välttämättä ole paras ratkaisu. (Murra et al. 2010)

Vesilaitoksen tulisi tunnistaa ne uhat, joilta halutaan erityisesti turvautua aikaista varoitusjärjestelmää suunniteltaessa. Vesilaitoksella voi olla tiettyjä toiveita suojata erityistä kohdetta enemmän kuin esimerkiksi normaalia asuinalueita. Kyseisiä kohteita voivat olla muun muassa sairaalat, vanhainkodit ja teollisuuslaitokset. Vesilaitoksella voi olla tietoa siitä, että jossakin verkoston osassa kontaminaatio on todennäköisempää kuin muualla, joka on hyvä ottaa huomioon suunnittelussa. Vesilaitoksen on tärkeää havaita erityiset toiveet ja tiedot verkostosta, jota verkostomalli ei sisällä (USEPA 2014). TEVA-SPOT-ohjelma perustuu sille, että verkostomallin jokaisessa solmussa kontaminaatio on yhtä todennäköinen. Tätä voi muuttaa, jos verkostossa on esimerkiksi kohtia, joissa kontaminaatio on todennäköisempi kuin muualla ja sitä halutaan tietoisesti korostaa. (Murra et al. 2010)

TEVA-SPOT-ohjelma koostuu kolmesta pääasiallisesta ohjelmistomoduulista (Kuva 7). Ensimmäinen moduuli simuloi vedenlaadullisia uhkakokonaisuuksia. Toinen moduuli laskee potentiaaliset seuraukset ensimmäisen moduulin simuloimille uhkakokonaisuuksille. TEVA-SPOTin laskemat vaikutukset kuvaavat yhteiskunnalle aiheutuvia sekä terveydellisiä että taloudellisia vaikutuksia. Terveydelliset vaikutukset kuvastavat loukkaantumisia, sairastumisia ja kuolemia. Taloudelliset vaikutukset sisällyttävät kaikki kustannukset mitkä käytetään verkoston korjaamiseen ja puhdistamiseen. Taloudellisiin vaikutuksiin luetaan myös kuuluvan lääketieteelliseen hoitoon käytetyt varat kuten sairaalahoido ja rokotukset ynnä muut. Kolmas moduuli optimoi sensoreiden sijoittamista perustuen aikaisemmin simuloituihin uhkakokonaisuuksiin ja niiden mahdollisiin seuraksiin. TEVA-SPOT suorittaa Monte Carlo-tyyppisiä simulaatioita tuottaen terveysvaikutusdataa eri skenaarioista. (Murra et al. 2010)



Kuva 7. Diagrammi TEVA-SPOT ohjelman toiminnasta (Murra et al. 2010).

Haitallisten vaikutusten mittana käytetään yleisesti väestöä, joka altistuu kontaminantille ylittäen ennalta määrätyn raja-arvon. Altistuminen tapahtuu vettä juotaessa tai hengityksen välityksellä. Kun vesijohtoverkosto on saastunut, lyhytaikainen altistuminen hengityksen välityksellä aerosolisille epäpuhtauksille voi olla mahdollista. Kaikista isoin riski altistumiselle silloin on suihkussa käynti ja erilaisten ilmankostuttimien käyttö. Hengityksen välityksellä altistuminen on saanut vähän huomiota juomiseen verrattuna, vaikka jotkin tutkimukset osoittavat, että hengityksen kautta altistumisella voi olla hyvin merkittävä kokonaisvaikutus saastumistapauksessa. Tietyillä kontaminanteilla jopa yhtä iso vaikutus kuin juomisella (Schijven et al. 2016; Davis et al. 2016). TEVA-SPOT ohjelmaan on integroitu vuonna 2016 uusi tapa tarkastella hengityksen välityksellä leviävien epäpuhtauksille altistumista, joka täydentää jo valmiita malleja juomisen vaikutuksia tarkastellessa. TEVA-SPOTissa on mahdollista tarkastella vain yhtä tiettyä kontaminanttia asettamalla sille aineelle tyypillinen terveysvaikutteinen raja-arvo kuten LD50.

Yhdysvaltain ympäristövirasto on tehnyt laajennusosan TEVA-SPOT-ohjelmalle, jonka nimi on Water Security Toolkit (WST). Sillä on mahdollista mallintaa ja optimoida vesilaitoksen reagointia kontaminaatiotapauksissa. Se tarjoaa työkaluja kontaminaation tunnistamiseksi sekä lähteen selvittämiseksi. Sillä on myös mahdollista simuloida verkoston

huuhtontaa paloposteista tai muista pisteistä, sekä tutkia verkoston shokkikloorauksen vaikutusta verkostossa (Murra et al. 2010).

3.6.2 Kontaminaatioskenaario

TEVA-SPOT-ohjelma simuloi kontaminaatioskenaarion jokaiseen sallittuun mallin solmuun. Kontaminaatiotapahtumaan vaikuttavia tekijöitä ovat sen ominaisuudet ja käytös vesijohtoverkostossa, kontaminantin määrä verkostossa, kontaminaation alkamisaika sekä kesto. Kontaminantin ominaisuuksiin liittyen TEVA-SPOTin käyttäjä päättää huomioidaanko sen mahdollinen hajoaminen reagoiessa putkien seinämien sekä kloorin kanssa. Muut tekijät riippuvat käyttäjän syöttämistä arvoista kontaminaatioskenaariota mallintaessa. (Murra et al. 2010)

Käyttäjien terveydelle kohdistuva uhka kasvaa, kun kontaminantin myrkyllisyys kasvaa. Hyvin myrkyllisten haitta-aineiden aiheuttamat vaarat kansanterveydelle ovat riippuvaisia verkoston ominaisuuksista, mutta vähemmän haitallisten aineiden aiheuttamat haitat ovat hyvin samanlaisia verkostoista toisiin. Myrkyllisten kontaminanttien aiheuttamat uhat nousevat mitä isompi verkosto on kyseessä, kun taas vähemmän myrkyllisten aineiden seuraukset ovat melko paikallisia ja riippuvat enimmäkseen kontaminantin kokonaismassasta verkostossa, eivätkä näin ollen riipu verkoston koosta. Sensoriverkosto tulisi suunnitella kaikista myrkyllisimmän kontaminantin mukaan, jonka esiintyminen verkostossa on mahdollista. Kontaminanttien muuttumisella verkostossa voi olla merkittävä vaikutus kontaminaatitapauksen arvioituille vaikutuksille. (Murra et al. 2010)

3.6.3 Laskennallisia huomioita

Vedenlaadun toleranssin parametri (Water Quality Tolerance Parameter) kuvaa pienintä vedenlaadun muutosta, joka otetaan vielä huomioon laskuissa. EPANETissä se on oletusarvoisesti 0.01 mg/l kemikaaleille. TEVA-SPOTissa sillä ei ole oletusarvoa, jolloin malli on yleensä tarkempi, mutta se pidentää laskemisaikoja huomattavasti isommilla malleilla. Näin ollen TEVA-SPOTissa sen oletetaan olevan 0, joka tarkoittaa, että alarajaa muutosten suuruudelle ei ole ja näin ollen tulokset ovat mahdollisimman tarkkoja. Vedenlaadun toleranssin parametrin ollessa 0, on sen vaikutus tuloksiin enimmäkseen vain pienten annosten saaneiden kanssa, jotka eivät yleensä riskianalyyssissä ole kriittisempiä tarkasteltavia. Tosin jotkin kontaminantit voivat vaikuttaa hyvin pienillä pitoisuuksilla ja vedenlaadun toleranssin parametri olisi hyvä suhteuttaa tarkasteltaviin aineisiin ja niiden injektion määrään. TEVA-SPOTissa voi olla hyvä käyttää kyseisen parametrin lukuna esimerkiksi 10^{-6} , sillä se on lievempi koneelta vaaditun tehon kannalta kuin 0, mutta antaa lähes yhtä hyviä tuloksia. (USEPA 2014)

TEVA-SPOT on ainut ohjelma, mikä kykenee arvioimaan seuraukset kontaminaatiosta vesijohtoverkostossa (Michael et al. 2017). EPANET-ohjelma tarjoaa mahdollisuuden

seurata kontaminantin pitoisuutta vesijohtoverkostossa. EPANET-ohjelmassa on ongelmia massan pysyvyyden kanssa. EPANETin säädöksissä ”water-quality time step”in (vedenlaadun laskennallinen ajanjakso) ei saisi olla liian pitkä, jotta konsentraatio virheitä ei tapahtuisi vedenlaadussa. Laskennallisen ajanjakson olisi hyvä olla pienempi kuin se aika, mikä vedellä kestää kulkea verkoston lyhimmän putken läpi. EPANETin käyttämä algoritmi vedenlaadun laskemiseksi verkostossa voi johtaa tilanteisiin, missä kontaminantin ainesta tulee verkostoon lisää tai katoaa. Kyseiset epätasapainot johtuvat EPANETin tavasta laskea vesimassan ja kontaminanttien aineksen kertymistä verkoston pisteissä ja niiden järjestäytymistä alavirtaan luovutettavaksi. Vedenlaadun laskennallisen ajanjakson minimi on EPANETissä 1 sekunti, joka joissakin tapauksissa ei ole tarpeeksi pitkä ajanjakso laskennallisten virheiden poistamiseksi. Lyhyen ajan käyttäminen vedenlaadun ajanjakson laskemiseksi nostaa mallinnukselta vaadittavaa koneellista tehoa huomattavasti. EPANETin käyttämä menetelmä vedenlaadun laskemiseksi ei näin ollen ole täydellinen. Jos halutaan mallintaa kontaminantin leviämistä tarkemmin, olisi tarpeellista kehittää vakaampi algoritmi, joka takaisi kontaminantin massan häviämättömyyden. (Michael et al. 2017)

(Michael et al. 2017):n artikkelissa on käsitelty algoritmia, joka on tapahtumaohjattu eikä aikaohjattu, kuten EPANETin nykyinen algoritmi vedenlaadun kontaminanttien laskemiseksi. Kyseisellä uudella algoritmilla on mahdollista tarkentaa simuloinnissa saatuja veden laadullisia tuloksia huomattavasti, sekä säästää koneelta vaadittua tehoa. Artikkelissa on suositeltu EPANETin nykyisen algoritmin käyttöön, että vedenlaadun laskennallisena ajanjaksona käytettäisiin pienempää aikaa kuin nykyinen oletusarvoinen 300 sekuntia, jotta laskennallisia virheitä ei muodostuisi huomattavasti.

3.7 Asiakkaiden ilmoitusten dokumentointi ja käyttö

Vesilaitoksen olisi hyvä luoda kannustava ilmapiiri asiakkaille vedenlaadun muutosten ilmoittamiseen, jotta se saisi tietoa vedenlaatuun liittyen. Kaikki vedenlaadun muutokset eivät kuitenkaan johdu vesijohtoverkostosta, sillä kiinteistön sisäisissä putkissa voi tapahtua vedenlaadun muutoksia, jos esimerkiksi vesi joutuu seisomaan pitkään. Hyvin dokumentoitu tietokanta asiakkaiden valituksista tukee jatkuvatoimisia mittauslaitteita verkostossa, sillä niiden avulla voidaan kehittää mittalaitteiden antaman datan analyysia. Jos laite antaa hälytyksen, joka tulkitaan vääräksi hälytykseksi, mutta asialkailta tulee soittoja vedenlaadun muutoksesta, voidaan väärin hälytysten analysoimiseen tehdä muutoksia. Joissakin tapauksissa asiakkaat voivat tottua huonolaatuiseen veteen, eivätkä valita asiasta (Kirmeyer et al. 2002). On mahdollista käyttää asiakasvalituksia eri päätösten apuvälineenä kuten jonkin alueen tai kadun saneerauksen priorisoimiseen. Sitä voidaan myös käyttää huuhtelun tarpeessa olevien alueiden tunnistamiseksi, tunnistaa eri raakavesilähteiden vaikutus vedenlaatuun sekä seurata valitusten trendiä vuodesta toiseen.

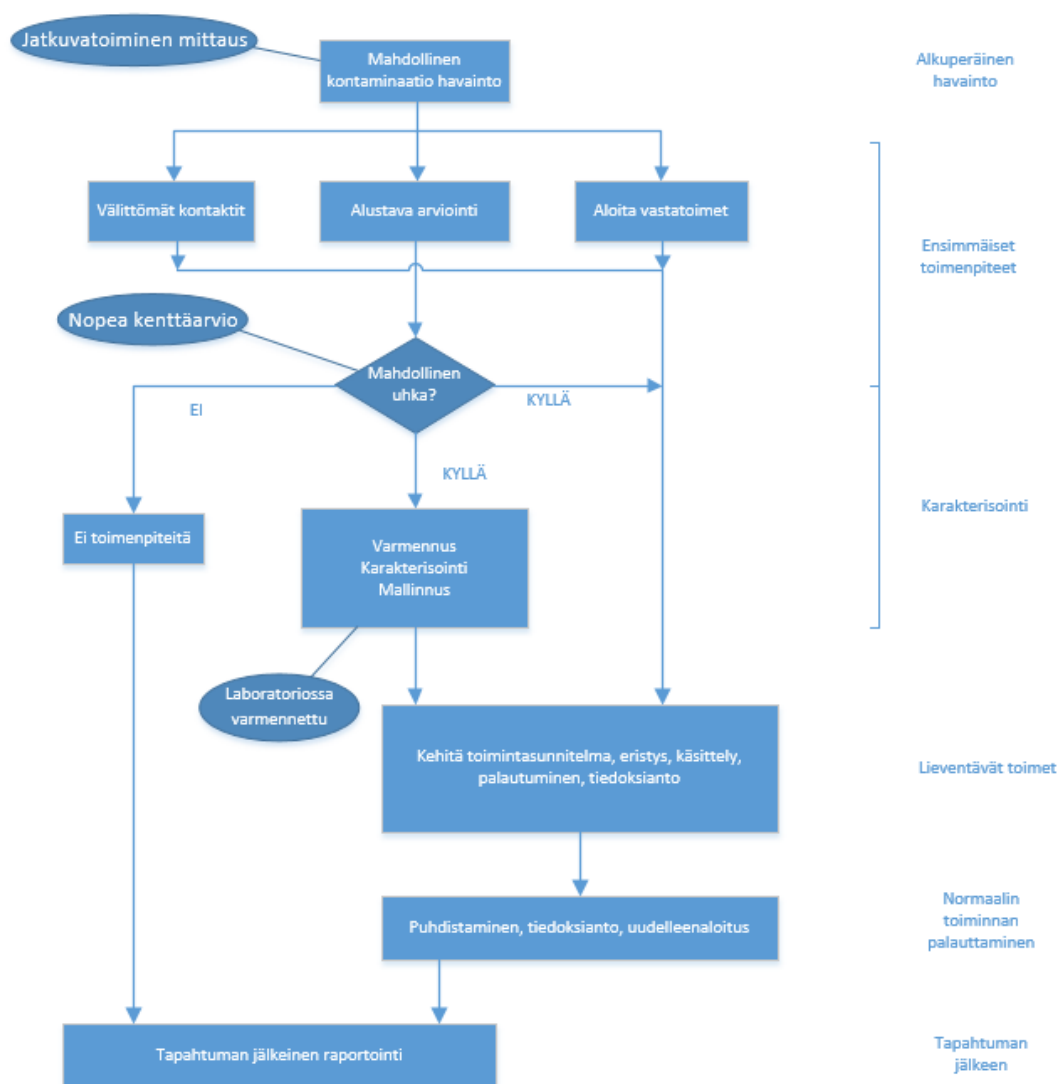
Vesilaitoksilla yleinen ohjesääntö on kertoa asiakkaille, jotka valittavat sakkaisesta vedestä, että heidän kannattaa valuttaa vettä hanasta jonkin aikaa, joka useimmiten poistaa sakan putkista. Tämä voi kuitenkin passivoida ihmisiä, sillä seuraavan kerran laatumuutosten sattuessa he voivat vain valuttaa vettä tietäen, että se on yleinen ohjesääntö, informoiden vesilaitosta vain silloin, jos muutokset eivät poistu vedestä tietyn ajan jälkeen. Asiakaspalautteiden perusteella veden laatumuutoksista on mahdollista saada tietoa vuodoista sekä verkoston kontaminaatiosta. Kehittämällä tietyt toimintatavat on mahdollista tehostaa ja standardisoida vesilaitoksen päätöksentekoa vedenlaadun valituksiin liittyen (Customer Complaint Surveillance Primer For Water Quality Surveillance and Response Systems 2015).

3.8 Vesilaitoksen reagointi kontaminaation havaitsemiseen

Vesilaitoksen on tärkeä tiedostaa, että reagointi kontaminaation havaitsemiseen on tärkein aikaisen varoitusjärjestelmän tehokkuuteen vaikuttava vaihe. Vesilaitoksen reagointitapoja voivat olla mm:

- hälytyksen luotettavuuden varmistaminen
- kontaminantin olemassaolon varmistaminen
- julkinen varoitus
- laitoksen fyysiset toimet verkostossa vaaran pienentämiseksi
- kansanterveydelliset toimet vaikutusten vähentämiseksi, kuten antamalla lääketieteellistä hoitoa ja/tai rokotus.

Aikaisen varoitusjärjestelmän tehokkuutta mittaavat mallit ottavat normaalisti huomioon reagointiajan, jonka jälkeen vedessä olevat vierasaineet eivät enää leviä verkostossa eikä saastunutta vettä käytetä. Reagointiaika on kontaminaation alkuperäisestä havaitsemista väestön tehokkaaseen varoittamiseen kestänyt aika, jonka yleisesti odotetaan olevan 0 - 48 tuntia. Nolla tuntia kestänyt reagointiaika on käytännössä mahdoton, mutta sitä voidaan käyttää kuvaamaan ideaalista tilannetta eli ylimmäistä raja-arvoa mittausverkoston toiminnalle. Vesilaitoksen pitää luoda oma reagointiprotokollansa aikaisen varoitusjärjestelmän toiminnan tukemiseksi (Kuva 8). Tämä olisi hyvä tehdä jo aikaisen varoitusjärjestelmän suunnitteluvaiheessa. (Murra et al. 2010)



Kuva 8. Vesilaitoksen mahdollinen reagointiprotokolla jatkuvatoimisen mittauksen hälytykseen. (Planning for and Responding to Drinking Water Contamination Threats and Incidents, 2003)

Vesilaitoksen toiminta lähtee kontaminaation mahdollisesta havainnosta. Tämän jälkeen vesilaitos suorittaa ensimmäiset toimenpiteet, joilla yritetään varmistaa kontaminaation todellisuus ja sen vaikutusten laajuuden alustava arviointi. Jos saastuminen todetaan todelliseksi, vesilaitoksen kannattaa ottaa näytteitä laajalta alueelta ja analysoida niitä kontaminantin karakterisoimiseksi, sekä tiedottaa asiakkaille tehokkaasti tilanteesta. Shokkiklooraus sekä huuhtelut ovat vesilaitoksen mahdollisia toimenpiteitä verkoston puhdistamiseksi. Tapahtuman jälkeinen raportointi on tärkeä osa kokonaisuutta, jotta voidaan oppia tehdyistä toimenpiteistä sekä mahdollisista virheistä. (Planning for and Responding to Drinking Water Contamination Threats and Incidents, 2003)

4. AINEISTO JA MENETELMÄT

4.1 Kohdealue

Työn kohteena oli Tampereen Veden vesijohtoverkosto. Tampereen Vesi toimittaa vesihuoltopalveluita Tampereen alueella sekä osalle lähikunnista kuten Pirkkalalle. Vuonna 2016 Tampereella tuotettiin 18,7 milj. m³ talousvettä, josta 70 % on pintavettä ja loput pohjavettä (30%). Tampereen kantakaupunkialueella pintavesi otetaan Roineesta sekä Näsijärvestä. Roineesta otettu raakavesi puhdistetaan Ruskon vedenkäsittelylaitoksella, kun taas Näsijärvestä otettu raakavesi puhdistetaan Kaupinojan saneeratulla vedenkäsittelylaitoksella. Pintavesilaitoksia on myös Teiskossa 2, Polson ja Kämmenniemen vedenkäsittelylaitokset. Tampereen Vedellä on viisi pohjavedenottamo, jotka sijaitsevat Mesukylässä, Hyhkyssä, Mustalammella, Pinsiössä ja Julkujärvellä. Vesitorneja on kuusi, jotka toimivat painepiiriensä vesivarastoina ja tasaavat vedentuotantotarvetta. Ne sijaitsevat Pyynikinharjulla, Kaupissa (2 kpl), Hervannassa, Peltolammilla ja Tesomalla. Vesijohtoverkosto on kokonaispituudeltaan 765 km. Tampereen kantakaupunkialueella verkosto jakaantuu kahdeksaan painepiiriin, jotka ovat keskusta-alue, Tesoma, Pyynikki, Pispala, Peltolampi, Hallila, Hervanta ja Aitolahti – Holvasti.

Tampereen Vedellä on oma laboratorio Ruskon vedenpuhdistuslaitoksella, missä suoritetaan vedenlaadun analyyskejä vesihuollon jokaiselle eri vaiheelle. Vuonna 2016 laboratoriossa tutkittiin 5 124 näytettä, joista tehtiin yhteensä 22 213 määritystä. Tutkituista näytteistä 45 % oli prosessin sisäisiä, 29 % verkostoon pumpattavia vesiä, 13 % eri raakavesilähteiden vesiä, 8 % verkostovesiä ja 5 % muita näytteitä. Tampereen Veden verkostovesinäytteet otettiin kaupungin eri puolilla sijaitsevista kahdeksasta kohteesta. Kyseisiä käyttötarkkailunäytteitä otettiin 381 kappaletta, eli keskimäärin noin yksi päivässä. Tampereen kaupungin ympäristöterveys vastaa verkostoveden laadun valvonnasta kunnallisena terveydensuojeluviranomaisena. Vuonna 2016 Tampereen kaupungin ympäristöterveys otti yhteensä 156 valvontanäytettä vesijohtoverkostosta 40 kohteesta eri puolilta verkostoa. Valvontanäytteiden analyysit suoritettiin ulkopuolisessa laboratoriossa. Tampereen Vedellä on tehty ja otettu käyttöön vuosina 2016-2017 talousveden tuotantoketjun kattavan riskinhallintajärjestelmän WSP:n. (Tampereen Veden vuosikertomus ja ympäristöraportti 2016)

4.2 Mallinnus

Työssä käytettiin pohjana FCGnet-ohjelmalla tehtyä mallia kohdealueesta, jota muokattiin EPANET-sovelluksella, jotta mallista saatiin toimiva sekä se vastasi verkoston ennustettua lähitulevaisuuden tilannetta. Mallin ottaminen FCGnetistä aiheutti joitakin ongelmia sen toimivuuteen, sillä EPANET ei tue tiettyjä kaupallisissa ohjelmissa yleisesti

mallinnettuja lisäosia kuten taajuusmuuttajalla toimivia pumppuja tai FCGnetin pumppupatteristoja. Nämä piti korvata mallissa perinteisellä pumpulla ja paine- tai virtaussäätöventtiilillä. Tämän jälkeen EPANET malli toimi EPS-simuloinnissa samalla tavalla kuin alkuperäinen FCGnetin malli. Malliin lisättiin verkostoa ja kulutuspisteitä kuvaamaan tulevaisuuden uusia asuinalueita. Uusien alueiden lisäämisessä malliin on paljon epätarkkuustekijöitä, sillä alueille meneviä putkia ja niiden liitoskohtia jo olemassa olevaan verkostoon ei ole suunniteltu, joten malliin lisätyt tulevaisuuden asuinalueiden verkostot ovat valistuneita arvauksia. Lisättyjä asuinalueita ovat Nurmi, Lintuhytti/Hervantajärvi, Vuores, Lielähti, Niemenranta sekä Ojala (Tampereen kaupunkiseutu 2014). Sensorioptimointi tulisi tehdä mahdollisimman uudella mallilla, jotta se olisi mahdollisimman kuvaava ja mahdollisuuksien mukaan validoitavissa.

Sensorisijainnin optimointia mallinnettiin TEVA-SPOTilla eri skenaarioilla, joissa vaihtuvina muuttujina olivat injektion ajankohta, injektion suuruus, injektion kesto, sijoitettavien mittareiden määrä, vesilaitoksen reagointiaika sekä sijoittamisen rajoittaminen tiettyihin kiinteistöihin.

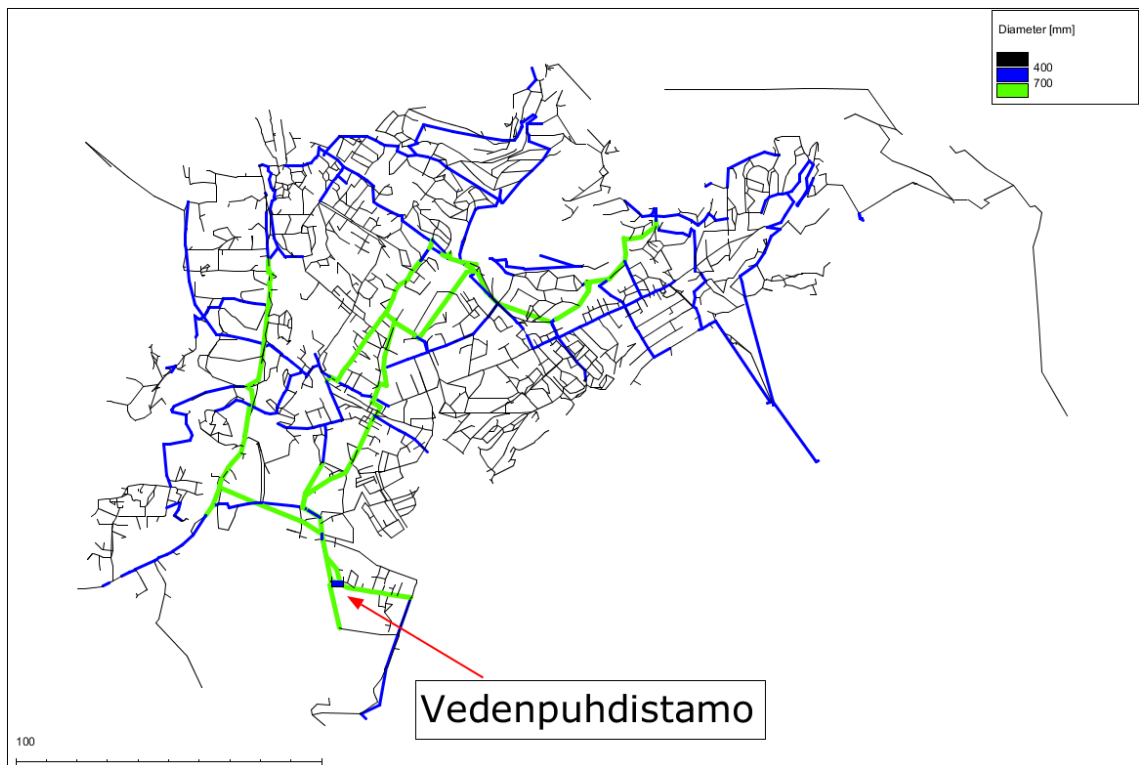
Työssä muodostettiin kaksi eri luokkaa mittareiden mahdollisista sijoittamispaikoista. Ensimmäinen sijoitusluokka muodostuu Tampereen Veden omista kiinteistöistä. Vesilaitoksen omista kiinteistöistä paineenkorotuspumppaamot, vesisäiliöt, jätevedenpuhdistamot ja toimistotila sopivat hyvin sensoreiden sijoituskohteiksi. Jätevedenpumppamoille on myös mahdollista sijoittaa sensoreita, mutta niiden pitää olla rakennus- tai bunkkeripumppaamo, jossa on toimiva vesipiste. Jätevedenpumppamoilla ei ole luontaista vedenkulutusta ollenkaan, paitsi huoltotilanteissa, joten sijoittaessa mittalaitteita jätevedenpumppamoille, olisi niihin tarpeellista säätää tarpeeksi iso jatkuva huuhtelu, jotta tonttijohdon vesi vaihtuisi. Tämä maksaisi vesilaitokselle jonkin verran vuosittain hukattuna vetenä, mutta ei kovin paljoa tonttijohdon ollessa pieniä ja lyhyitä. Veden vaihtuvuuden keston tulisi olla tonttijohdossa alle tunnin koko osuudelta, jotta se olisi liitoskohtaa edustava (Personal communication with Robert Janke (USEPA),). Kohdealueella on yhteensä 102 jätevedenpumppamoa, joista 19 täyttävät kriteerit sensorien mahdolliselle sijoittamiselle. Yhteensä Tampereen Veden kiinteistöjä oli 41, mihin olisi mahdollista sijoittaa mittalaitteita.

Toinen sijoitusluokka koostuu palolaitoksista, poliisiasemasta, sairaaloista, kouluista, päiväkodeista, lukioista sekä yliopistoista kohdealueella. Kyseessä olevista kiinteistöistä tehty lista on esitetty liitteessä 2. Osassa kyseisistä kohteista ongelmana on se, ettei niissä ole vedenkulutusta loma-aikoina tai vedenkulutus on hyvin vähäistä. Kiinteistöihin voi olla myös vaikea päästä kaikkina ajankohtina. Osassa kiinteistöjä verkostomallista katsottuna ei ollut selvää, että mistä kohtaa verkostoa kiinteistön tonttijohdo sijaitsee. Tämän takia on käyty läpi kohdealueen liitoskohtalausuntoja, jotta on saatu varmuus kiinteistön oikealle liittymiskohdalle. Näiden listojen tuomaa parannusta sensoriverkoston tehokkuuteen voi vertailla niiden haittapuolien kanssa. Kun päädytään lopulliseen päätökseen

mittalaitteiden sijainnista, olisi kohteet tarkastettava paikan päällä, jotta ne varmasti täyttävät vaatimukset.

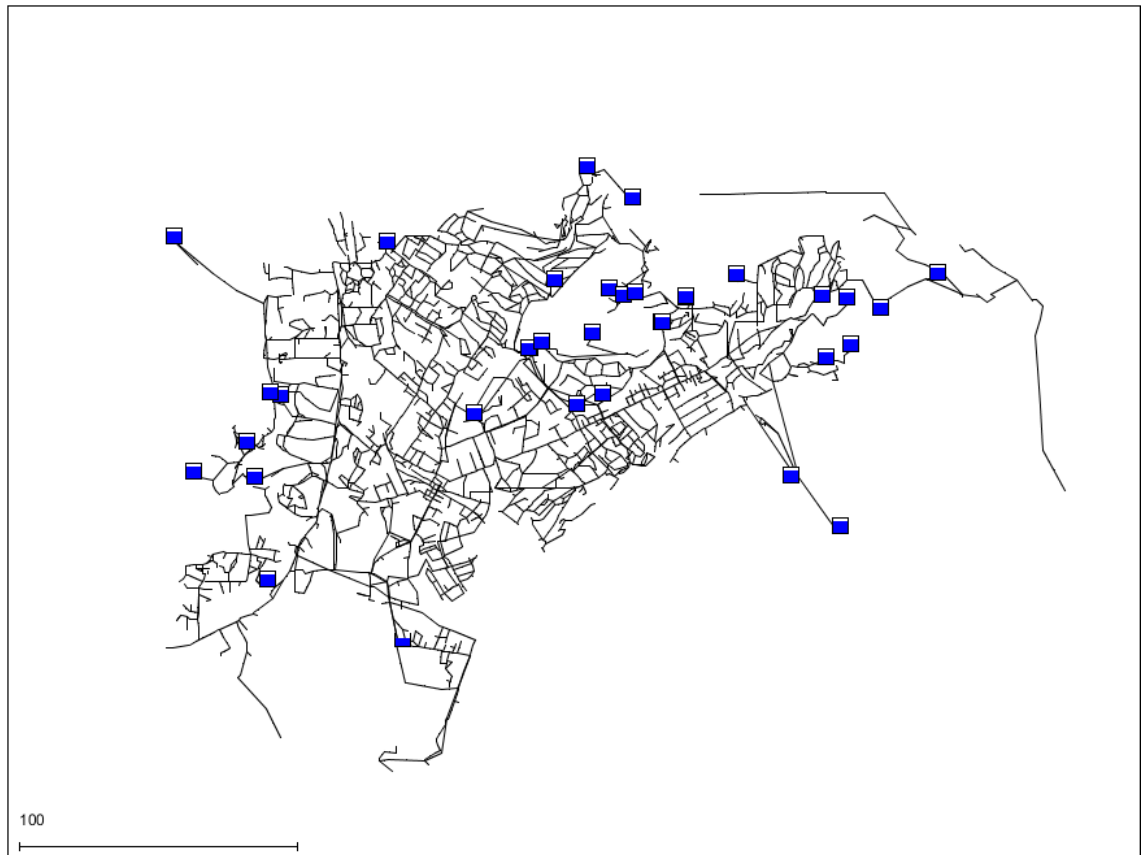
4.3 Verkoston katsaus

Simuloinnit TEVA-SPOTilla suoritettiin tässä työssä kohdealueen verkostomallilla, joka oli tehty kuvaamaan tulevaisuuden verkoston tilannetta. TEVA-SPOTin toimintoja havainnollistetaan fikttiivisellä esimerkkimallilla (Kuva 9), sillä kohdealueen tietojen julkaiseminen ei ole haluttua.



Kuva 9. Esitetty malli vedenpuhdistamon sijainnista sekä verkoston runkoputket eri väreillä koon mukaan.

Esimerkkimallilla on yksi vedenpuhdistamo, joten kyseiseen malliin tulee vettä pelkästään eteläisestä osasta. Verkoston runkoputket ovat levittäytyneet tasaisesti ympäri verkostoa. Mallissa on 34 vesisäiliötä (Kuva 10), jotka turvaavat painepiiriensä vedensaannin erikoistilanteissa, kuten tulipalon aikana, sekä tasaavat vedenpuhdistamon ja pumpujen toimintaa.



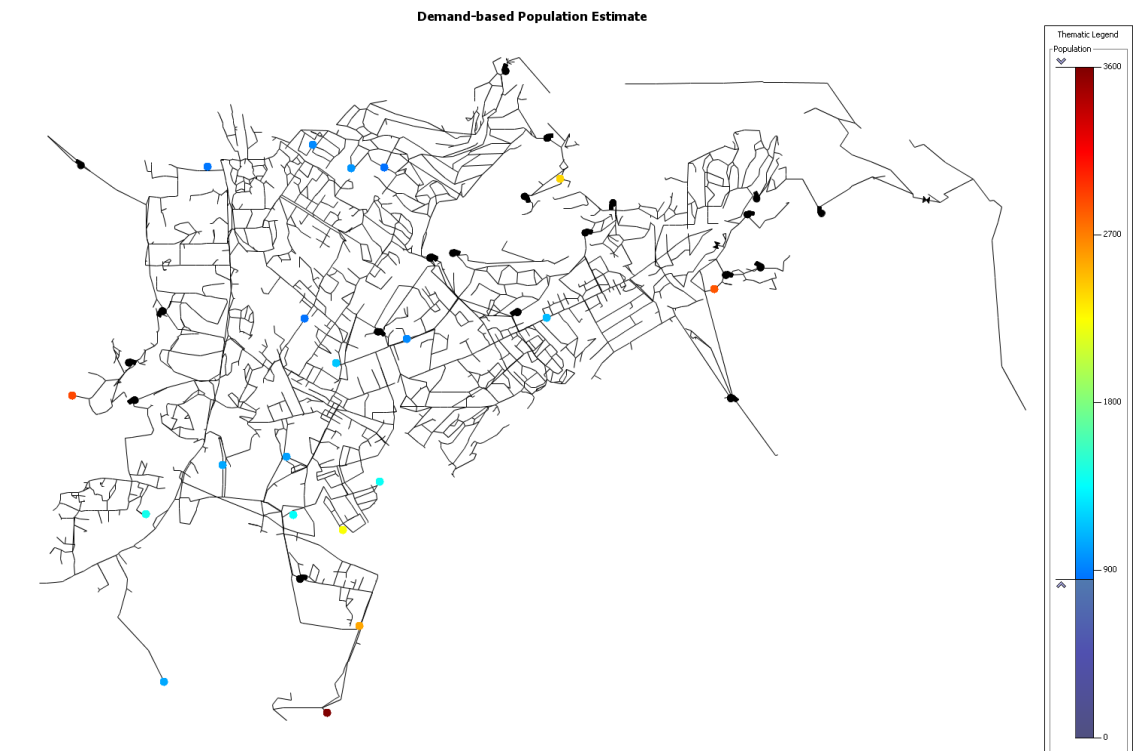
Kuva 10. Esimerkkimallin vesisäiliöiden sijainnit.

TEVA-SPOT jakaa verkoston asukasluvun vedenkäytön perusteella jokaiselle solmulle, joista suurimpia kulutuspisteitä on syytä tutkia tarkemmin (Taulukko 3). Asukasluvun muodostamisessa ei oteta sitä huomioon, että vedenkäyttö voi olla teollisuuden tarpeeseen, eikä asukkaiden omaa. Onkin hyvä tutkia TEVA-SPOTin tuottamia väestölaskelmia ja voi olla haluttua jättää teollisuuden aiheuttaman väestön huomioimatta laskelmissa.

Taulukko 3. Mallin 20 solmua, joissa on suurimmat väestönkeskittymät.

Solmu	Väestö
JUNCTION-1600	3600
JUNCTION-2794	2896
JUNCTION-3212	2849
JUNCTION-50	2563
JUNCTION-2828	2392
JUNCTION-138	2234
JUNCTION-2484	1410
JUNCTION-1583	1385
JUNCTION-101	1365
JUNCTION-431	1149
JUNCTION-2609	1113
JUNCTION-1337	1043
JUNCTION-1178	1042
JUNCTION-200	1017
JUNCTION-2310	979
JUNCTION-1913	937
JUNCTION-2222	936
JUNCTION-807	871
JUNCTION-459	855
JUNCTION-2092	852

Verkostokartasta olisi hyvä tarkistaa missä suurimmat väestönkeskittymät sijoittuvat (Kuva 11) ja tarkastaa ovatko ne teollisuuden vedenkulutusta.



Kuva 11. Verkoston 20 suurinta vedenkulutusta on esitettyinä väritettyinä solmuina.

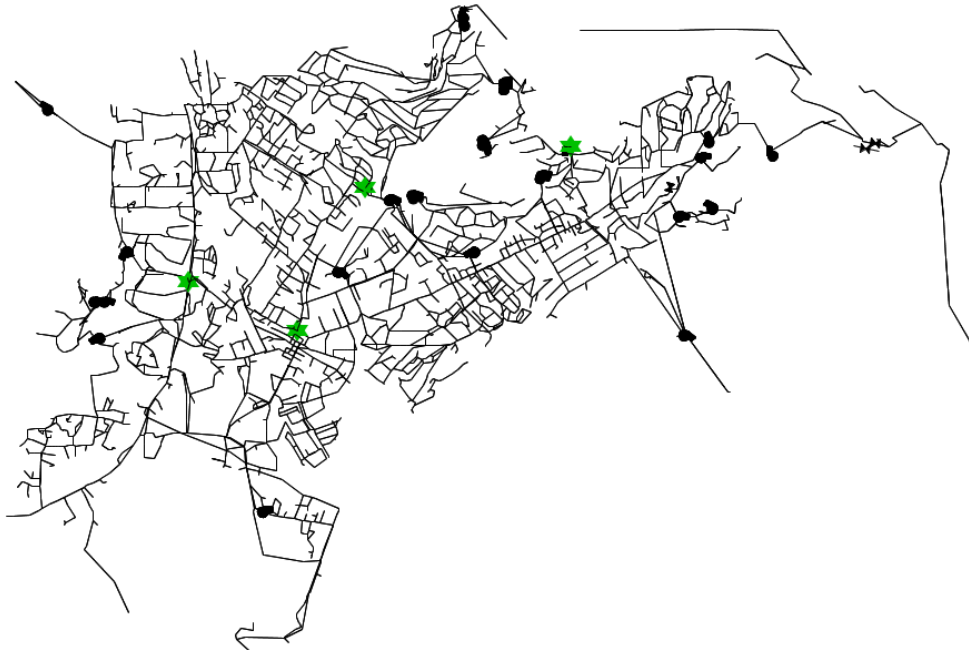
Isoja vedenkuluttajia voivat olla myös kylpylät tai maatalous, joihin toimitetun vedenlaadun turvaaminen voi olla yhtä lailla haluttua kuin asutusalueille.

5. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Työssä tutkittiin vedenlaadun jatkuvatoimisten mittarien sijoittamista vesijohtoverkoston kohdealueella. Työssä käytettiin TEVA-SPOT-ohjelmaa, jolla voidaan suorittaa verkoston riskianalyysitarkasteluja sekä mittalaitteiden sijoittamisen optimointianalyysia. Tarkastelut perustuvat annettaviin kontaminaatioskenaarion ja halutun aikaisen varoitussjärjestelmän parametreihin. Kaikissa tehdyissä mallinuksissa tarkasteltiin vain juomisen kautta aiheutuvia haittavaikutuksia kontaminaatioskenaarioissa, eikä hengityksen välityksellä altistumista otettu huomioon.

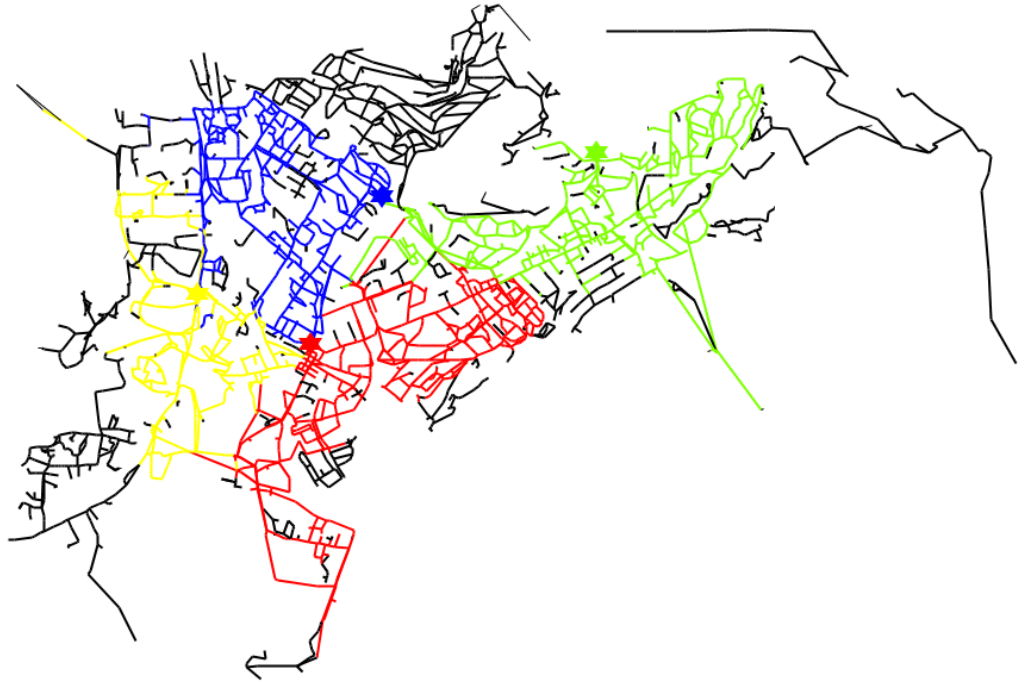
5.1 Mittalaitteiden sijoitus

Työssä suoritettiin kymmeniä eri skenaarioita TEVA-SPOTilla tutkien eri parametrien vaikutusta kohdeverkostoon sijoitettavien mittalaitteiden optimaalisiin sijainnin suosituksiin. Vaihtuvina muuttujina olivat injektion aika, injektion suuruus, injektion kesto, kontaminantin terveysvaikutukset, juomismetodi, sijoitettavien mittalaitteiden määrä, vesilaitoksen reagointiaika sekä sijoittamisen rajoittaminen tiettyihin kiinteistöihin. TEVA-SPOTista saa jokaiselle yksittäiselle skenaariolle optimaalisen sensorien sijoitussuosituksen (Kuva 12).



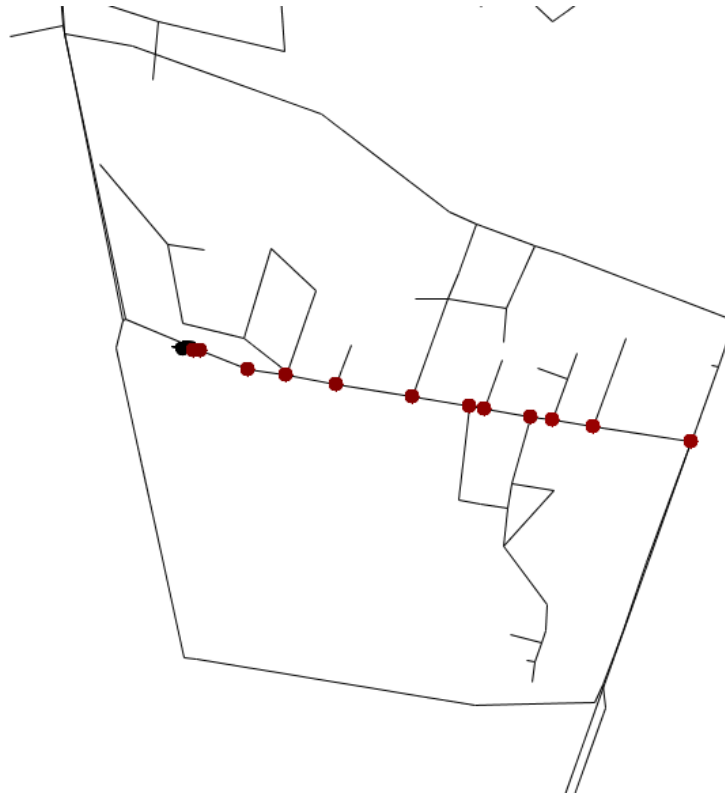
Kuva 12. Sensorien suositellut sijaintipaikat tietyillä parametreilla esimerkiverkostossa. (vihreät tähdet)

Sensoriverkoston optimaalisuus ei ole yksiselitteinen käsite, vaan se riippuu monesta eri vesilaitoskohtaisesta tekijästä. Vesilaitoksen olisi hyvä muodostaa realistinen kuva verkoston mahdollisista uhkista sekä omasta toiminnasta aikaista varoitussjärjestelmää suunniteltaessa. TEVA-SPOT antaa optimaalisille sensorisijainneille karttaesityksen, jossa on esitetty eri väreillä eri sensorien kattamia alueita (Kuva 13).



Kuva 13. Sensorien havaitsema alue, eli se alue, missä kontaminaation sattuessa kyseisen sensori havaitsee kontaminantin.

TEVA-SPOTilla on mahdollista tutkia vesijohtoverkostomallin kriittisimpiä kohtia kontaminaation kannalta, eli niitä kohtia verkostossa, joissa kontaminaation sattuessa ovat vaikutukset mahdollisimmat laajat (Kuva 14). Yleensä kyseiset kohdat ovat runkojohtoja, sillä niistä vesi leviää suurelle alueelle altistaen mahdollisimman paljon asukkaita saastuneelle vedelle.

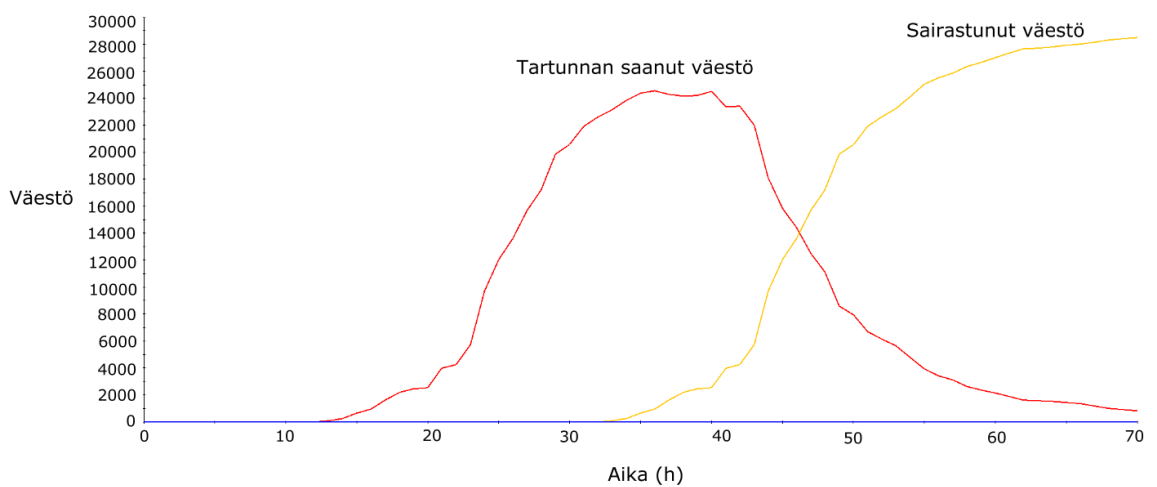


Kuva 14. Verkoston haavoittuvaisimmat kohdat.

Verkoston hydraulisesta toiminnasta riippuen voi olla mahdollista, että asuinalueella voi olla kriittisiä kohtia, joista vesi leviää eteenpäin suurelle alueelle.

5.2 Väestön tartunnan saaminen

Yhdellä skenaariolla tutkittiin kuvitteellista noroviruskontaminaatiota kohdealueen verkostossa (Kuva 15). Tälle skenaariolle annettiin taudin itämisajaksi 20 tuntia, mikä on norovirukselle tyypillinen keskimääräinen arvo.

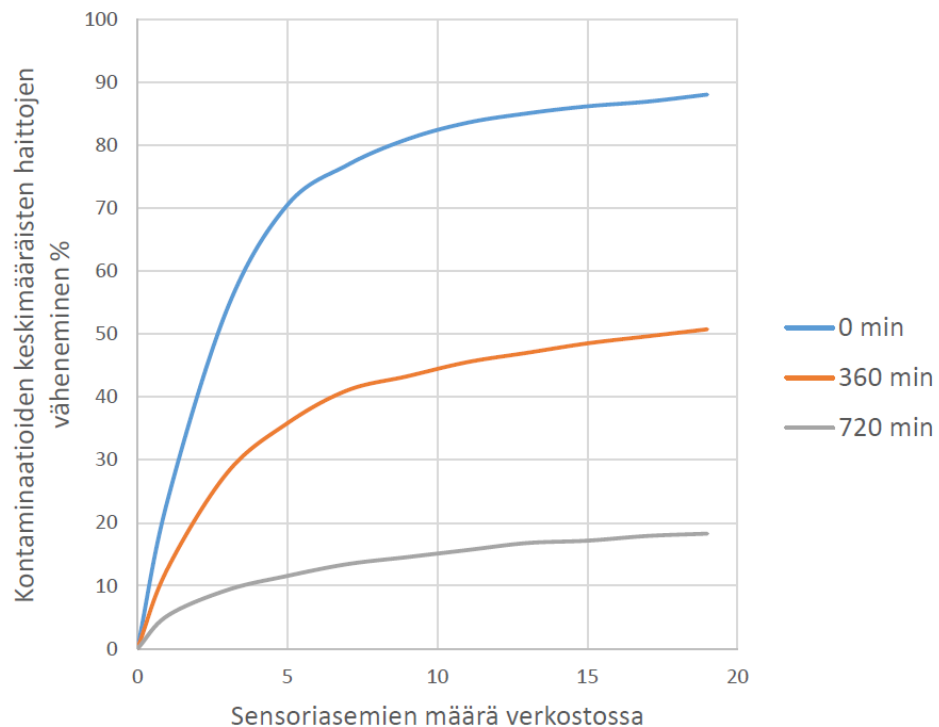


Kuva 15. Norovirus skenaario.

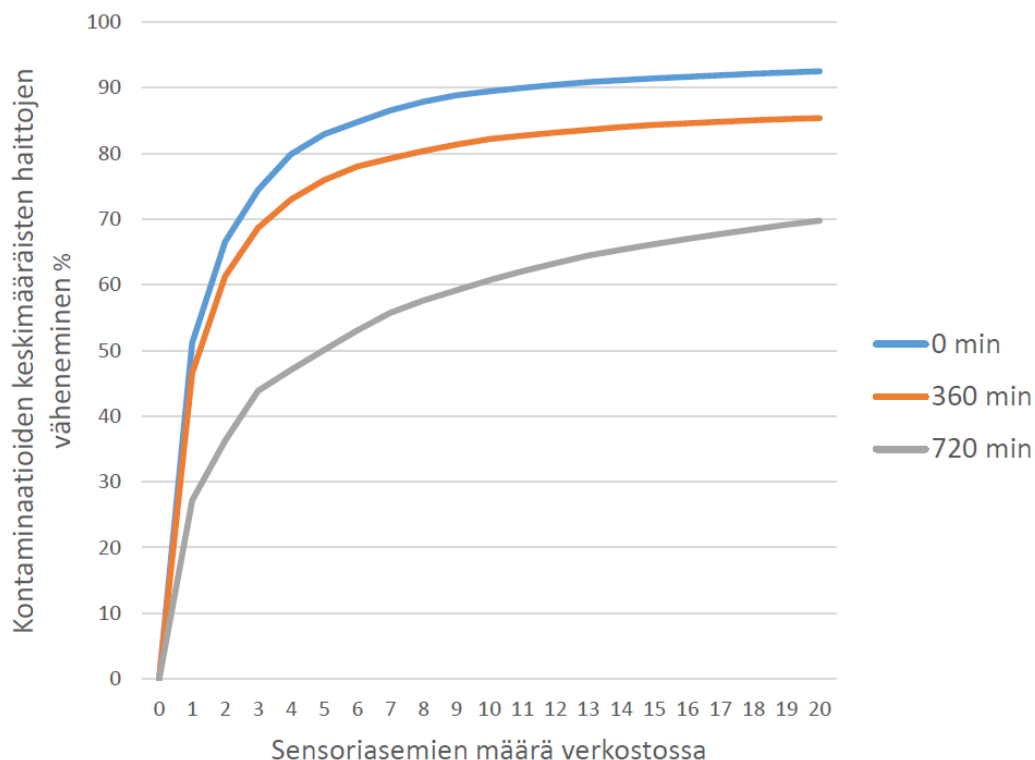
Malli osoittaa, että tapausesimerkissä noroviruksen aiheuttamassa vesiepidemia skenaariossa suurin osa vesijohtoverkoston välityksellä tartunnan saaneista ihmisistä on jo saanut tartunnan siinä vaiheessa, kun ensimmäiset ihmiset sairastuvat ja ilmoittautuvat sairaaloihin. Yleensä vesilaitokset reagoivat kontaminaatiotapauksiin vasta tässä vaiheessa, sillä sairastumiset ovat ensimmäinen konkreettinen merkki mahdollisesta veden saastumisesta. Tämä havainnollistaa vesilaitoksen tarvetta vähentää reagointiaikaa esimerkiksi aikaisella varoitusjärjestelmällä, jotta mahdollisia tartuntatapauksia saataisiin vähennettyä. Tautien levitessä alun perin veden välityksellä, tarttuvat ne myöhemmin myös ihmisiltä toisille.

5.3 Vesilaitoksen reagointiaika

Reagointiaika on merkittävin aikaisen varoitusjärjestelmän tehoon vaikuttava tekijä, johon vesilaitos voi vaikuttaa. Reagointiaika tarkoittaa sitä aikaa, mikä vesilaitoksella kuluu sensorin havainnosta tiedon validoimiseen ja sen perusteella toimimiseen. Eli reagointiaika on se aika mikä kuluu kontaminaation ensimmäisestä havainnosta siihen, että vesilaitos aloittaa toimet estääkseen kenenkään altistumisen estämiseksi. Mitä isompi reagointiaika, sitä pienempi aikaisesta varoitusjärjestelmästä saatu hyöty on (kuvat 17 ja 18). On muistettava, että kyseiset kuvaajat kuvastavat vain yksittäisiä skenaarioita tietyillä annetuilla parametreilla.



Kuva 16. Sensoriasemien määrän vaikutus kontaminaatioiden keskimääräisten haittojen vähenemiseen. Kyseessä on kontaminaatitapaus, jolla on pienet keskimääräiset vaikutukset verkostossa.



Kuva 17. Sensoriasemien määrän vaikutus kontaminaatioiden keskimääräisten haittojen vähenemiseen. Kyseessä on kontaminaatitapaus, jolla on isot keskimääräiset vaikutukset verkostossa.

Keskimääräinen haittojen väheneminen kuvastaa skenaariolle annettua tavoitetta, joka on ollut kaikissa tarkasteluissa kontaminantille altistuvan väestön minimoiminen. Aikainen varoitusjärjestelmä vähentää keskimääräisiä haittoja prosentuaalisesti enemmän, mitä isompi kontaminaatitapaus on kyseessä. Tämä pätee erityisesti mitä hitaampi reagointiaika vesilaitoksella on. Ideaalireagointiajan (0 min) tapauksessa, keskimääräisten haittojen vähenemisellä ei ole niin merkittävää eroa skenaarion ollessa vaikutuksiltaan iso tai pieni, kun taas reagointiajan ollessa 720 min, on aikaisen varoitusjärjestelmän vaikutus moninkertainen isossa kontaminaatitapauksessa verrattuna pieneen kontaminaatitapaukseen.

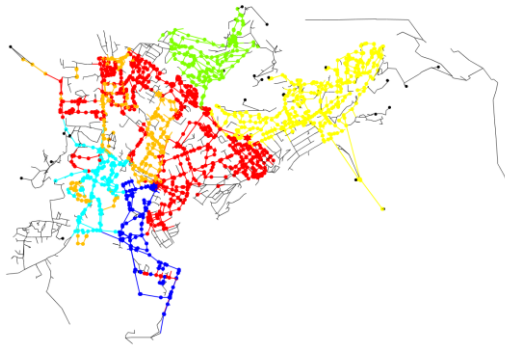
Sensoriasemien kokonaismäärän lisääminen parantaa aikaisen varoitusjärjestelmän tehokkuutta. Saatu hyöty sensorien määrän lisäämisestä vähenee huomattavasti kohdealueella noin kymmenen jälkeen. Kohdealueella saavutetaan suhteellisen hyvä aikaisen varoitusjärjestelmän teho viidellä sensoriasemalla. Aikaista varoitusjärjestelmää suunniteltaessa on tärkeää pyrkiä mahdollisimman korkeaseen sensoriasemien hyötysuhteeseen.

Reagointiaika vaikuttaa sensorien sijoittamiseen. Tutkituissa verkostomalleissa ilmeni, että pidemmällä reagointiajalla sensorit ovat lähempänä veden lähdettä, havaiten näin pienemmällä alueella tapahtuvat konsentraatiot. Lyhyemmällä reagointiajalla TEVA-SPOT

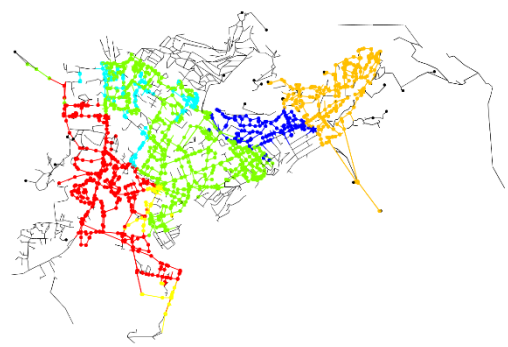
ehdottaa sensoreiden sijainniksi kauempana veden lähdettä olevia kohteita, turvaten näin isomman alueen. Tämä johtuu siitä, että reagointiajan ollessa suhteellisen iso, ei aikaisesta varoitusjärjestelmästä saada niin paljon keskimääräistä hyötyä verkoston laidoilla, koska suurimmat vaikutukset ovat jo tapahtuneet siihen mennessä, kun vesilaitos pystyy reagoimaan tapahtumaan.

Sensorien sijainteja optimoitaessa reagointiaika vaikuttaa tietyllä sensorimäärällä saatuun verkoston kattavuuteen. Ideaalitulanteessa (reagointiaika 0 tuntia) suurin osa verkostosta on katettu optimaalisella sensorijärjestelmällä, kun taas 35 tunnin reagointiajalla sensorisysteemi kattaa alle puolet verkostosta (Kuva 18). Osaa verkoston alueista turvaa moni sensoriasema ja todellisuudessa tämä olisi hyödyllistä saadun sensorihälytyksen validoimiseksi, ei TEVA-SPOTissa ole siitä hyötyä, sillä sensorit oletetaan toimintavarmuudeltaan olevan täydellisiä, eikä hälytystä näin ollen ole tarpeen validoida.

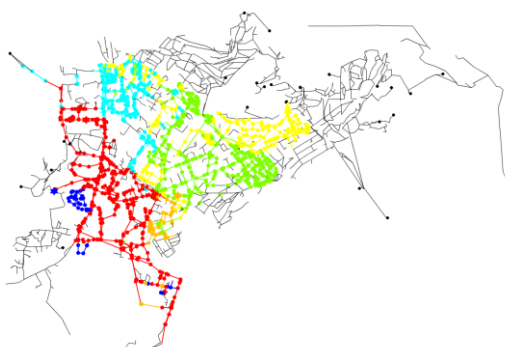
Reagointiaika 0 tuntia



Reagointiaika 5 tuntia

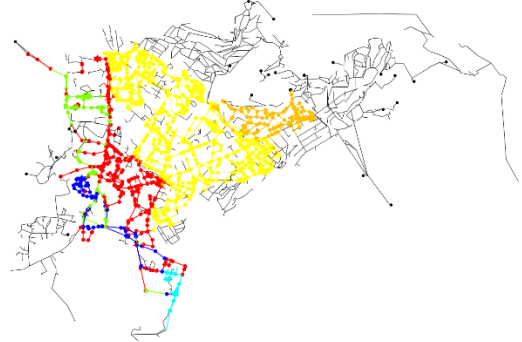
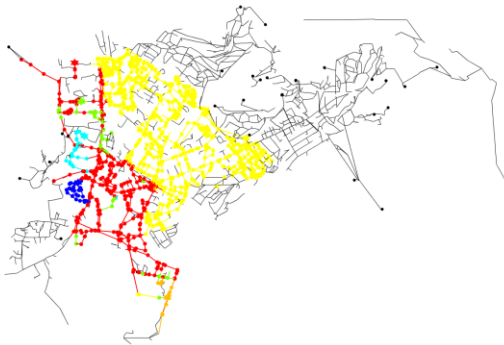
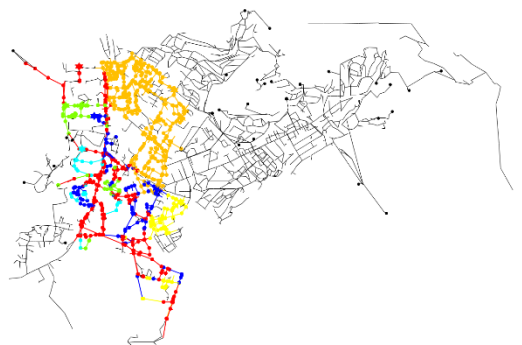


Reagointiaika 10 tuntia



Reagointiaika 15 tuntia



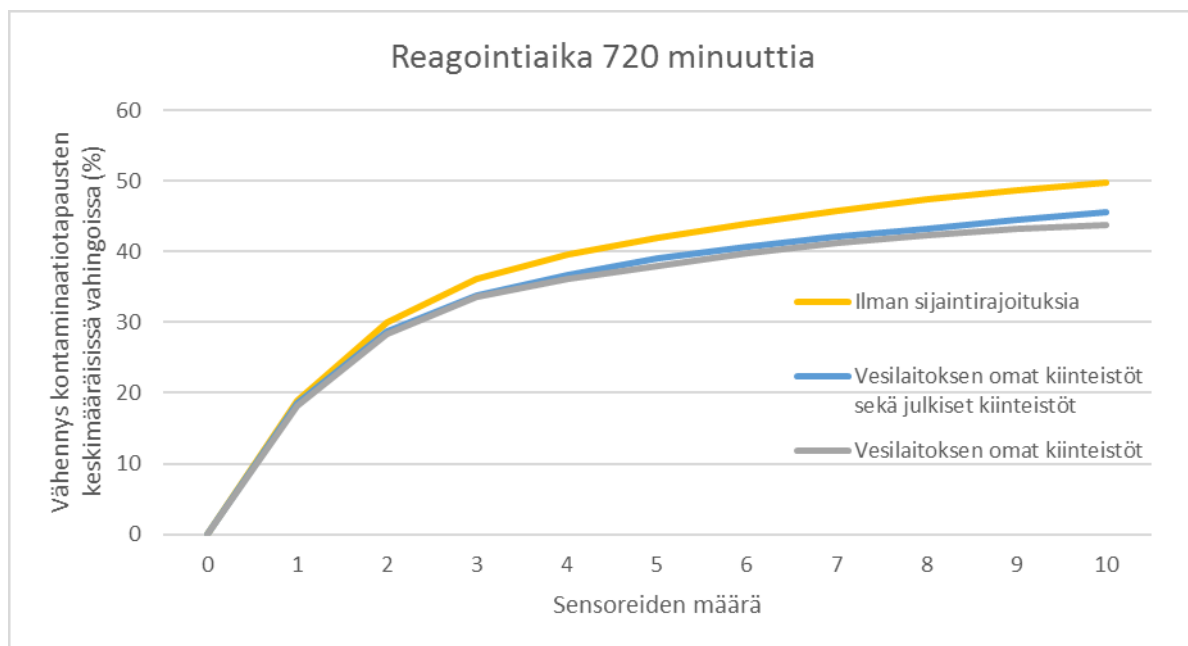
Reagointiaika 20 tuntia**Reagointiaika 25 tuntia****Reagointiaika 30 tuntia****Reagointiaika 35 tuntia**

Kuva 18. Reagointiajan vaikutus sensoriverkoston kattavuuteen esimerkiskenaariossa.

Reagointiajan vaikutus sensoriverkoston kattavuuteen ei ole niin hyvin havaittavissa verkostoissa, joissa on vedenpuhdistamoja eri puolilla verkostoa, ja veden liikkumisen suunta verkostossa vaihtelevampaa esimerkiksi vuorokauden eri aikoina.

5.4 Sijoittamisen rajoittaminen kiinteistöihin

TEVA-SPOT määrittää normaalitilanteessa verkoston optimaalisimmat paikat sensoreiden sijainnille välittämättä siitä, onko sensorin sijoittaminen kyseiseen kohtaan mahdollista. Kadulle tai puistoon on mahdollista asentaa mittauskaivoja, mutta ne ovat kalliita vaaten sähkökytkennän, viemäröinnin sekä asennuksen. Sijoittamisen rajoittaminen tiettyihin kiinteistöihin heikentää aikaisen varoitusjärjestelmän tehoa (Kuva 19), mutta se on taloudellisesti järkevää.

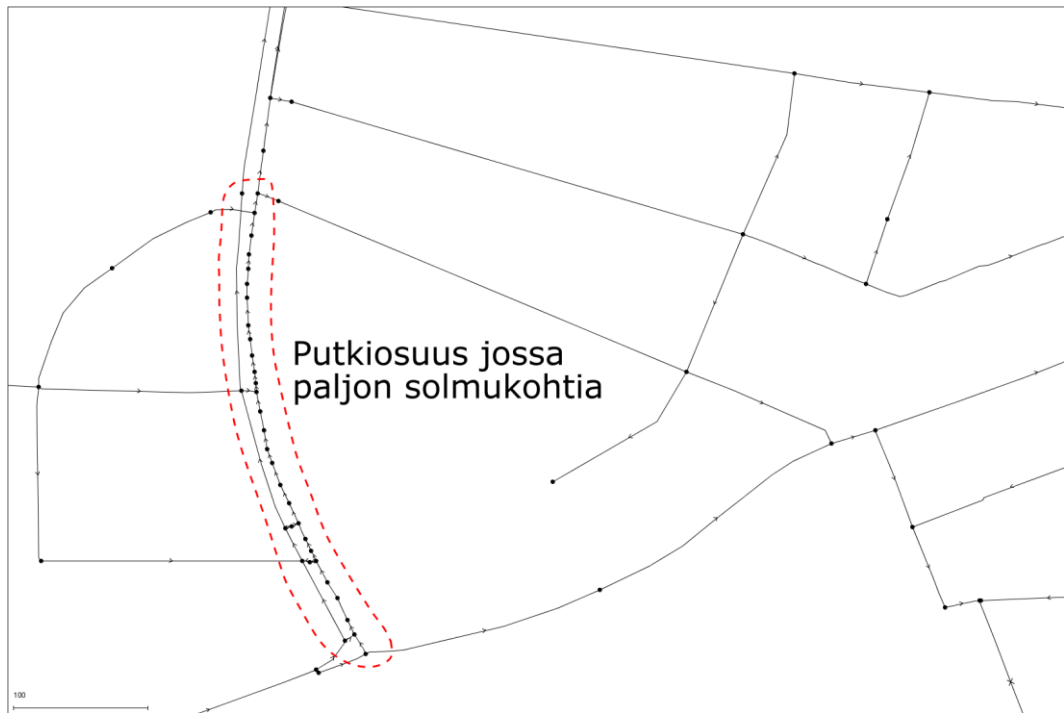


Kuva 19. Sijoittamisen rajoittaminen eri kategorioihin.

Kohdealueen tapauksessa sijaintien rajoittaminen ei laske aikaisen varoitusjärjestelmän tehoa merkittävästi, verrattuna siitä saataviin hyötyihin kuten mahdollisesti lyhyempään reagointiaikaan. Sensoreiden sijainnin optimoiminen ilman sijaintirajoituksia ei ole realistista todellisuudessa, mutta sitä voidaan käyttää kuvastamaan ideaalitulannetta. Mitä enemmän mittareita sijoitetaan verkostoon, sitä enemmän sensorien rajoittaminen tiettyihin kohteisiin laskee systeemin tehoa.

5.5 Mallissa olevien solmujen määrän tiheys

EPANET-malli tulisi tehdä suunnilleen samalla solmujen määrällä keskimäärin jokaisen verkoston eri alueella. TEVA-SPOTissa voi määrittää ne pisteet missä verkoston saastuminen voi tapahtua. Yleisesti saastumisen voidaan olettaa tapahtuvan vain pisteissä, missä on kulutusta. Tällöin TEVA-SPOT ei ota käsittelyyn esimerkiksi runkojohtoja, joiden vaikutus saastumistapauksessa voi vaikuttaa merkittävästi sensorien sijoittamisen kokonaisuuteen. Yhtenä ongelmana on se, että jos mallissa on muihin putkiosuuksiin verrattuna suhteellisesti enemmän solmukohtia tietyssä kohtaa verkostoa tai tietyllä putkiosuudella, ja jokaisella solmulla on määrättyä vedenkulutusta, olettaa TEVA-SPOT, että kyseinen alue on alttiimpi kontaminaatiolle ja näin ollen aluetta olisi tarvetta painottaa mittalaitteiden sijoittamisen optimoinnissa (Kuva 20).



Kuva 20. Kohdealueen mallissa on yhdellä putkiosuudella suhteessa enemmän solmuja.

Kyseisen alueen alttiutus kontaminaatiolle ei kuitenkaan ole totta, ellei malliin ole tahallaan tehty enemmän solmuja kuvaamaan alttiutta. Verkostomallia tehdessä solmujen luomiseen ei ole yhtenäisiä ohjesääntöjä, ja jokainen mallintaja luo solmuja oman mielensä mukaan. Tärkeintä olisi olla johdonmukainen koko verkoston osalta.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tavoitteena oli selvittää vesijohtoverkoston vedenlaadun jatkuvatoimisen mittauksen nykyinen tilanne, sekä selvittää mahdollisia mittalaitteiden sijaintisuosituksia verkostossa. Vesijohtoverkoston vedenlaadun tilannetta ymmärretään huonosti tällä hetkellä, eikä äkkinäisiä vedenlaadullisia muutoksia pystytä hallitsemaan. Lainsäädännön tiukentuessa sekä sensoriteknologian parantuessa, jatkuvatoiminen vedenlaadun mittaus verkostossa isommalla mittakaavalla tulee todennäköisesti lisääntymään. Markkinoilla on olemassa useita erilaisia menetelmiä käytäviä mittalaitteita, mutta niiden toiminnan verifioimiseksi ja validoinniksi tarvitaan lisää tutkimusta.

Sensorien sijoittaminen on vesilaitoskohtaista riippuen kyseessä olevan verkoston hydraulisista ominaisuuksista, sijoitettavista mittareista ja niiden ominaisuuksista, väestön sijoittumisesta, vedenpuhdistuslaitosten määrästä ja puhdistusmetodeista, vesilaitoksen omien kiinteistöjen sijainnista verkostossa sekä mahdollisista erityisesti suojeltavista kohteista. Aikainen varoitusjärjestelmä on tarkoitettu epätodennäköisen, mutta vaikutuksiltaan hyvin suuren tapahtuman estämiseen tai vahingon minimoimiseen. Sensoriverkostolla voi olla myös muita hyötyjä vesilaitokselle riippuen mitattavista parametreista.

Sijoitettujen sensorien kokonaismäärää lisäämällä saadaan parannettua aikaisen varoitusjärjestelmän tehoa kohteessa. Tutkitussa kohteessa viidellä sijoitettavalla mittalaitteella saadaan suhteellisen hyvä teho. Vesilaitoksen suunniteltu ja tehokas reagointi mittareiden tuottamaan varoitukseen on yksi aikaisen varoitusjärjestelmän toiminnan tärkeimmistä vaiheista. Reagointiajan minimointi on mahdollista sijoittamalla mittalaitteita, luomalla reagointimenetelmät ja toimintatavat sekä tehokas asiakkaiden varoitusjärjestelmä.

Aikaisen varoitusjärjestelmän suunnittelu vaatii informoituja päätöksiä, minkä apuna voidaan käyttää siihen tarkoitettuja ohjelmia ja mallinnusta. Ohjelmat antavat mahdollisuuden tutkia erilaisia aikaisen varoitusjärjestelmän kokoonpanoja ja niiden toimintaa annetuilla oletuksilla. Aikaisen varoitusjärjestelmän suunnittelu on monimutkainen ja iso kokonaisuus, johon vaikuttavat monet tekijät. Sensorien optimaalinen sijoittaminen on yksi tärkeä osatekijä kokonaisuudessa.

Tämän tutkimuksen perusteella mittalaitteiden optimaalisia sijainteja on mahdollista selvittää siihen tarkoitettulla ohjelmalla. Tätä kuitenkin vaikeuttaa tähän tarkoitukseen tehdyn ohjelman keskeneräisyys. Lisätutkimukselle aiheesta olisi tarvetta.

LÄHTEET

Aksela, K. (2012). Vesijohtoverkoston reaaliaikainen hallinta - hanke loppuraportti, 59 p. Available: http://civil.aalto.fi/midcom-serveattachmentguid-1e3f2228b1db340f22211e3b7d013e7a3365de25de2/savel_loppuraportti.pdf.

Aral, M.M., Guan, J. & Maslia, M.L. (2010). Optimal Design of Sensor Placement in Water Distribution Networks, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 136(1), pp. 5-18.

Bitton, G. (2014). Microbiology of Drinking Water Production and Distribution (1), Wiley-Blackwell, Somerset, US, 316 p.

Blackburn, B., Craun, G., Yoder, J., Hill, V., Calderon, R., Chen, N., Lee, S., Levy, D. & Beach, M. (2004). Surveillance for waterborne-disease outbreaks associated with drinking water --- United States, U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina, Available: <http://www.cdc.gov/mmWr/previeW/mmWrhtml/ss5308a4.htm>.

Blokker, E.J., Furnass, W., Machell, J., Mounce, S., Schaap, P. & Boxall, J. (2016). Relating Water Quality and Age in Drinking Water Distribution Systems Using Self-Organising Maps, Environments, Vol. 3(2), pp. 17.

Cheong, S., Choi, G. & Lee, H. (2016). Barriers and Solutions to Smart Water Grid Development, Environmental Management, Vol. 57(3), pp. 509-515.

Committee on Indicators for Waterborne Pathogens (2004). Indicators for Waterborne Pathogens, National Academies Press, Washington, 332 p.

Committee on Public Water Supply Distribution Systems: Assessing and Reducing Risks & National Research Council (2006). Drinking Water Distribution Systems : Assessing and Reducing Risks, National Academies Press, Washington, US, 391 p.

Customer Complaint Surveillance Primer For Water Quality Surveillance and Response Systems (2015). https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/customer_complaint_surveillance_primer.pdf ed., United States Environmental Protection Agency, pp. 6.

Davis, M., Janke, R. & Taxon, T. (2016). Assessing Inhalation Exposures Associated with Contamination Events in Water Distribution Systems, PLOS ONE, Vol. 11(12), pp. 41.

GUARDIANBLUE™ - Early Warning System - (2007). in: The first and only early warning system for drinking water certified by the department of homeland security, HACH, <https://www.hach.com/event-detection-and-security/guardianblue-early-warning-system/family-downloads?productCategoryId=35547627778>, pp. 18.

Guidelines for drinking-water quality, Volume 1 : Recommendations, (2003). 3rd ed., World Health Organization, Geneva, 542 p.

Hart, D.B., McKenna, S.A., Murray, R., Haxton, T., Elise, K.A., Vugrin, E.D. & Wilson, M.P. (2012). CANARY User's Manual, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 72 p. Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?subject=Homeland%20Security%20Research&dirEntryId=253555.

Hojris, B., Christensen, S., Albrechtsen, H., Smith, C. & Dahlgvist, M. (2016). A novel, optical, on-line bacteria sensor for monitoring drinking water quality, SCIENTIFIC REPORTS, Vol. 6pp. 23935.

Ikonen, J. (2013). Talousveden early warning -projekti, Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, Kuopio, Suomi, 15 p. Available: http://www.vvy.fi/files/2781/Talousveden_Early_Warning_LOPPURAPORTTI.pdf.

Janke, R., Murray, R., Baranowski-Haxton, T., Taxon, T., Bahadur, R., Samuels, W., Berry, J., Boman, E., Hart, W., Riesen, L.A., Phillips, C., Watson, J., Uber, J. & Morley, K. (2012). Threat Ensemble Vulnerability Assessment - Sensor Placement Optimization Tool (TEVA-SPOT) Graphical User Interface User's Manual, EPA/600/R-08/147, U.S. EPA National Homeland Security Research Center, 98 p.

Janke, R. & Davis, M.J. (2015). Influence of Network Model Detail on Estimated Health Effects of Drinking Water Contamination Events, Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 141(1), pp. 9.

Karttunen, E. (2010). Vesihuoltoverkkojen suunnittelu. 1, Perusteet ja toiminnallisuus, Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL, Helsinki, 177 sivua p.

Khublaryan, M.G. & Moiseenko, T.I. (2009). Water quality, Herald of the Russian Academy of Sciences, Vol. 79(3), pp. 230-236.

Kirmeyer, J., Friedman, M., Martel, K. & Thompson, G. (2002). Guidance manual for monitoring distribution system water quality, Awwa Research Foundation, U.S.A, 181 p.

Kloorauksen sivutuotteet, Terveiden ja hyvinvoinnin laitos, web page. Available (accessed 19.10.2016): <https://www.thl.fi/fi/web/ymparis-toterveys/vesi/talousvesi/kloorauksen-sivutuotteet/sivutuotteiden-aineryhmat>.

Kroll, D. (2011). 8. Is it Real or Isn't it? Addressing Early Warning System Alarms, in: Borchers, U., Gray, J. & Thompson, K.C. (ed.), Water Contamination Emergencies: Monitoring, Understanding and Acting, Royal Society of Chemistry, pp. 82-87.

Lappalainen, J., Tammelin, M., Rummukainen, M., Kinnunen, M. & Pitkänen, T. Terveiden ja hyvinvoinnin laitoksen (THL) tiedote 21.11.2016, Äänekosken Energia, web page. Available (accessed 5.4.2018): <https://www.aanekoskenenergia.fi/hairiotiedotteet/terveyden-ja-hyvinvoinnin-laitoksen-thl-tiedote-21-11-2016/>.

Lee, A., Francisque, A., Najjaran, H., Rodriguez, M.J., Hoorfar, M., Imran, S.A. & Sadiq, R. (2012). Online Monitoring of Drinking Water Quality in a Distribution Network: a Selection Procedure for Suitable Water Quality Parameters and Sensor Devices,

International Journal of System Assurance Engineering and Management, Vol. 3(4), pp. 323-337.

Lumio, J. Norovirus, DUODECIM, web page. Available (accessed 7.4.2018): http://www.terveyskirjasto.fi/terveyskirjasto/tk.koti?p_artikkeli=dlk00738.

Martyusheva, O. (2014). Smart Water Grid, Plan B technical report, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 43 p. Available: http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/Rising%20Stars%20Web-site/Martyusheva,Olga_PlanB_TechnicalReport.pdf.

Michael, J., Davis, Robert, J. & Thomas, N., Taxon (2017). Mass Imbalances in EPA-NET water-quality simulations, Drinking Water Engineering and Science (DWES), pp. 37.

Murra, R., Haxton, T., Janke, R., Hart, W., Berry, J. & Phillips, C. (2010). Sensor Network Design for Drinking Water Contamination Warning Systems - A Compendium of Research Results and Case Studies Using the TEVA-SPOT Software, EPA/600/R-09/141, United States Environmental Protection Agency, 71 p. Available: <https://www.hsdl.org/?abstract&did=25096>.

Mustonen, S.M., Tissari, S., Huikko, L., Kolehmainen, M., Lehtola, M.J. & Hirvonen, A. (2008). Evaluating online data of water quality changes in a pilot drinking water distribution system with multivariate data exploration methods, Water Research, Vol. 42(10), pp. 2421-2430.

Nazarovs, S., Dejus, S. & Juhna, T. (2012). Modelling water quality in drinking water distribution networks from real-time direction data, Drinking Water Engineering and Science, Vol. 5(1), pp. 39-45.

Panguluri, S., Meiners, G., Hall, J. & Szabo, J. (2009). DISTRIBUTION SYSTEM WATER QUALITY MONITORING: SENSOR TECHNOLOGY EVALUATION METHODOLOGY AND RESULTS, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio, 60 p. Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?subject=Homeland%2520Security%2520Research&dirEntryId=212368.

Personal communication with Robert Janke (USEPA), 14.2.2017.

Planning for and Responding to Drinking Water Contamination Threats and Incidents, (2003). Module 1, Water Utilities Planning Guide, USEPA, 44 p. Available: <https://www.epa.gov/waterutilityresponse/drinking-water-and-wastewater-utility-response-protocol-toolbox>.

Raich, J. (2013). Review of sensors to monitor water quality, Chemical and biological risks to the water sector European Commission, Italy, 27 p. Available: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC85442/lbna26325enn.pdf>.

Rapala, J. EU:n ehdotus uudeksi juomavesidirektiiviksi korostaa riskinarviointia talousveden laadun varmistamiseksi, Sosiaali- ja terveysministeriö, web page. Available (accessed 7.4.2018): http://stm.fi/artikkeli/-/asset_publisher/eu-n-ehdotus-uudeksi-juomavesidirektiiviksi-korostaa-riskinarviointia-talousveden-laadun-varmistamiseksi.

Rapala, J. Talousveden toimenpideohjelma - Water Safety plan, Sosiaali- ja terveysministeriö, web page. Available (accessed 7.4.2018): <http://stm.fi/talousveden-toimenpideohjelma>.

Schijven, J., Forêt, J.M., Chardon, J., Teunis, P., Bouwknegt, M. & Tangena, B. (2016). Evaluation of exposure scenarios on intentional microbiological contamination in a drinking water distribution network, Water research, Vol. 96pp. 148-154.

Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista (2015). 1352. Available: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20151352>.

Storey, M.V., van der Gaag, B. & Burns, B.P. (2011). Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems, Water Research, Vol. 45(2), pp. 741-747.

Tampereen kaupunkiseutu (2014). in: Rakennesuunnitelma 2040, Seutuhallitus, pp. 50.

Tampereen Veden vuosikertomus ja ympäristöraportti (2016). Tampereen Vesi, Tampere, pp. 29.

Räihä (2018). in: Jopa sata legionellatartuntaa jää pimentoon vuosittain - Arviolta joka kymmenes sairastunut kuolee, YLE, <https://yle.fi/uutiset/3-10108210>, .

Taustatietoa vesiepidemioista, Terveyden ja hyvinvoinnin laitos, web page. Available (accessed 5.4.2018): <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/vesiepidemiat/taustatietoa>.

Umberg, K., Umberg, M. & Allgeier, S. (2014). Water Security Initiative: Evaluation of the Water Quality Monitoring Component of the Cincinnati Contamination Warning System Pilot - Monitoring and Surveillance, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, 105 p. Available: https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-06/documents/wsi_evaluation_of_the_water_quality_monitoring_component_of_the_cincinnati_contamination_warning_system_pilot.pdf.

USEPA (2014). Application of TEVA-SPOT for Prioritizing Security Enhancements at Utility Facilities and for Protection of Critical Facilities , EPA/600/R-14/433, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, Available: https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?dirEntryId=292628.

Vehmaskoski, T. (2015). Rakennetun omaisuuden tila 2015, ROTI, Helsinki, 64 p. Available: http://www.ril.fi/media/2017/2017-vaikuttaminen/roti-2017/taustat/roti_2015_net_sivut_final_250215.pdf.

Vesivahinko - ennaltaehkäistävä painajainen, Omataloyhtiö.fi, web page. Available (accessed 1.12.2016): http://www.omataloyhtio.fi/artikkelit/12745/vesivahinko_ennaltaehkaistava.htm.

Walski, T.M. (2003). Advanced water distribution modeling and management, Haestad Press, Waterbury (CT), .

Zacheus, O.M., Lehtola, M.J., Korhonen, L.K. & Martikainen, P.J. (2001). Soft deposits, the key site for microbial growth in drinking water distribution networks, Water Research, Vol. 35(7), pp. 1757-1765.

LIITE I

1. Talousveden laatuvaatimukset ja -suositukset

Taulukko 1. Mikrobiologiset laatuvaatimukset

Muuttuja	Enimmäisarvo	Yksikkö
<i>Escherichia coli</i>	0	pmy/100 ml
Enterokokit	0	pmy/100 ml

Taulukko 2. Kemiaalliset laatuvaatimukset

Muuttuja	Enimmäisarvo	Yksikkö	Huomautus
Akryyliamidi	0,10	µg/l	(1)
Antimoni	5,0	µg/l	
Arseeni	10	µg/l	
Bentseeni	1,0	µg/l	
Bentso(a)pyreeni	0,010	µg/l	
Boori	1,0	mg/l	
Bromaatti	10	µg/l	(2)
1,2-dikloorietaani	3,0	µg/l	
Elohopea	1,0	µg/l	
Epikloorihydriini	0,10	µg/l	(1)
Fluoridi	1,5	mg/l	
Kadmium	5,0	µg/l	
Kloorifenolit yhteensä	10	µg/l	(3)
Kromi	50	µg/l	
Kupari	2,0	mg/l	(4)
Lyijy	10	µg/l	(4)
Nikkeli	20	µg/l	(4)
Nitraatti (NO ₃ ⁻)	50	mg/l	(5)
Nitriitti (NO ₂ ⁻)	0,50	mg/l	(5)
Polysykliset aromaattiset hiilivedyt yhteensä	0,10	µg/l	(6)
Seleeni	10	µg/l	
Syanidit	50	µg/l	
Tetrakloorieteeni ja trikloorieteeni yhteensä	10	µg/l	
Torjunta-aineet	0,10	µg/l	(7 ja 8)
Torjunta-aineet yhteensä	0,50	µg/l	(7)
Trihalometaanit yhteensä	100	µg/l	(2 ja 9)
Uraani	30	µg/l	
Vinyylikloridi	0,50	µg/l	(1)

Huomautukset

- 1) Pitoisuus lasketaan veden kanssa kosketuksissa olevasta polymeeristä tuoteselosteen mukaan enimmillään irtoavasta tai liukenevasta määrästä. Vedessä todetun aineen enimmäisarvona sovelletaan toteamisrajaa.
- 2) Desinfiointitehoa vaarantamatta on pyrittävä mahdollisuuksien mukaan tätä alemmaan pitoisuuteen.
- 3) Tarkoitettut yhdisteet ovat tri-, tetra- ja pentakloorifenoli.
- 4) Näyte otetaan käyttäjän vesihanasta siten, että pitoisuus vastaa viikoittaista keskiarvoa.
- 5) Nitriitin enimmäispitoisuus vedenkäsittelylaitokselta lähtevässä vedessä on 0,10 mg/l. Nitraattipitoisuus/50 + nitriittipitoisuus/3 ei saa ylittää arvoa 1.
- 6) Tarkoitettut yhdisteet ovat bentso(b)fluoranteeni, bentso(k)fluoranteeni, bentso(ghi)peryleeni ja indeno-(1,2,3cd)-pyreeni.
- 7) Tarkoitettut yhdisteet ovat orgaanisia hyönteis-, rikkaruoho-, sieni-, ankerois-, punkki-, levä- ja jyrsijämyrkkijä, orgaanisia limantorjunta-aineita sekä muita vastaavia tuotteita sekä yhdisteiden metabolia-, hajoamis- ja reaktiotuotteita.
- 8) Aldriinin, dieldriinin, heptakloorin ja heptaklooriepoksidin enimmäisarvo on 0,030 µg/l
- 9) Tarkoitettut yhdisteet ovat kloroformi, bromoformi, dibromikloorimetaani ja bromidikloorimetaani.

Taulukko 3. Laatusuosituksset

	<i>Enimmäispitoisuus</i>	<i>Huomautus</i>
Alumiini	200 µg/l	
Ammonium (NH ₄ ⁺)	0,50 mg/l	
Ammoniumtyppi (NH ₄ -N)	0,40 ”	
Kloridi	100 ”	(1,2)
Mangaani	50 µg/l	(3)
Rauta	200 ”	(3)
Sulfaatti	250 mg/l	(1,4)
KmnO ₄ -luku	20 mg/l	
COD _{Mn} , O ₂	5 mg/l	
Koliformiset bakteerit	0 pmy/100 ml	(5)
Radon	300 becquerel/l	(6)
<i>Tavoitetaso</i>		
pH	6,5 - 9,5	(1)
Sähkönjohtavuus	alle 2 500 µS/cm	(1)
Sameus	1,0 NTU	
Väriluku	5	
Haju ja maku	ei selvää vierasta hajua tai makua	

Huomautukset:

- 1) vesi ei saa olla syövyttävää
- 2) vesijohtomateriaalien syöpymisen ehkäisemiseksi kloridipitoisuuden tulisi olla **alle 25 mg/l**
- 3) 1 §:n 3 kohdan talousvedelle raudan enimmäispitoisuus on **alle 400 µg/l** ja mangaanin enimmäispitoisuus **alle 100 µg/l**
- 4) vesijohtomateriaalien syöpymisen ehkäisemiseksi sulfaattipitoisuuden tulisi olla **alle 150 mg/l**
- 5) 1 §:n 3 kohdan talousvedelle koliformisten bakteerien enimmäispitoisuus on **alle 100 pmy/100 ml**
- 6) 1 §:n 3 kohdan talousvedelle radonin enimmäispitoisuus on **alle 1000 becquerel/l**

LIITE 2

Julkiset kiinteistöt		
Koulut	Päiväkodit	Lukiot ja ammattikoulut
Aleksanterin koulu	Multisillan päiväkot	Sammon lukio
Annalan koulu	Peltolammin päiväkot	Kalevan lukio
Karosen koulutalo	Tasanteen päiväkot	Tampereen klassillinen lukio
Atala	Metsästäjän päiväkot	Tampereen yhteiskoulun lukio
Harju	Itätuulen päiväkot	Tampereen lyseon lukio
Kalkun koulutalo	Ilmattaren päiväkot	Hatanpään lukio
Hämälä	Vehmaisten päiväkot	Tammerkosken lukio
Kanjoni	Annalan päiväkot	Tampereen aikuislukio
Hallilan koulutalo	Lukonmäen päiväkot	Tampereen teknillinen lukio
Kissanmaa	Kaukajärven päiväkot	Tampereen seudun ammattiopisto Tredu - Koivistontien toimipiste
Koivisto	Linnainmaan päiväkot	Tampereen seudun ammattiopisto Tredu - Hepolamminkadun toimipiste
Lamminpää	Luhtaan päiväkot	Tampereen seudun ammattiopisto Tredu - Sammonkadun toimipiste
Leinola	Irjalan päiväkot	Tampereen terveydenhuolto-opilaitos
Lentävänniemi	Pappilan päiväkot	
Messukylä	Ankkarin päiväkot	Sekalaiset
Olkahinen	Messukylän päiväkot	Tampereen yliopisto
Sorilan koulutalo	Turtolan päiväkot	Tampereen teknillinen yliopisto
Peltolampi	Muotialan päiväkot	Keskuspoliisiasema
Pispala	Veisun päiväkot	Tampereen ammattikorkeakoulu
Hyhkyn koulutalo	Pihlajan päiväkot	Pirkkalan terveyskeskus
Rahola	Koivistonkylän päiväkot	Hatanpään sairaala
Tammela	Klaavan päiväkot	TAYS
Tesomajärvi	Lepolan päiväkot	Pirkkalan paloasema
Ikurin koulutalo	Kuuselan päiväkot	Hervannan paloasema
Vehmainen	Rantaperkiön päiväkot	Satakunnankadun paloasema
Vuores	Viinikan päiväkot	Linnainmaan paloasema
Etelä-Hervanta	Idesrannan päiväkot	Pispalan paloasema
Kisapuiston koulutalo	Järvensivun päiväkot	
Juhannuskylä	Steiner päiväkot	
Kaukajärvi	Pellervon päiväkot	
Lielähti	Kalevanharjun päiväkot	
Linnainmaa	Vellamon päiväkot	
Pohjois-Hervanta	Pikku tutkijan päiväkot, Tammela	
Sampo	Pohjolan päiväkot	
Järvensivu	Lapinniemen päiväkot	
Takahuhti 1-4 luokat	Jussinkylän päiväkot	
Takahuhti 5-9 luokat	Amurin päiväkot	
Tampereen kansainvälinen koulu	Tahmelan päiväkot	
Hatanpää	Pispalan päiväkot	
Kaarila	Hyhkyn päiväkot	
Pyynikki	Nahkatehtaan päiväkot	
Tesoma	Väripilkun päiväkot	
Kalenvanpuisto	Tesoman päiväkot	
Puistokoulu	Kalkun päiväkot	
Koivikkopuisto	Kalkunvuoren päiväkot	
Rahola/erityisluokat	Ikurin päiväkot	
Saukonpuisto	Länsi-Tesoman päiväkot	
Normaalikoulu luokat 7-9	Piiriniityn päiväkot	
Tamp. kristillinen koulu	Tohlopin päiväkot	
Tamp. Rudolf Steiner -koulu	Lamminpään päiväkot	
Svenska samskolan	Lintulammen päiväkot	
Pirkkalan yläaste ja yhteisluokio	Niemenrannan päiväkot	
Kurikankulman koulu	Lentävänlaakson päiväkot	
Nuolialan koulu		
Kirkonkylän ala-aste		
Toivion koulu		